



Ricerca di Sistema elettrico

## Sviluppo strumenti software per la modellazione di edifici e impianti in Pompa di Calore

G.L. Morini, C. Naldi, P. Valdiserri, C. Biserni



## SVILUPPO STRUMENTI SOFTWARE PER LA MODELLAZIONE DI EDIFICI E IMPIANTI IN POMPA DI CALORE

G.L. Morini, C. Naldi, P. Valdiserri, C. Biserni (Dipartimento di Ingegneria Industriale, Alma Mater Studiorum - Università di Bologna)

Aprile 2021

### Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - II annualità

Obiettivo: Tecnologie

Progetto: Tecnologie per la penetrazione efficiente del vettore elettrico negli usi finali

Work package: Pompe di calore

Linea di attività: *Sistemi complessi di PdC integrate: Sviluppo strumenti s/w per la simulazione utenza e sistemi complessi.*

Responsabile del Progetto: Claudia Meloni, ENEA

Responsabile del Work package: Raniero Trinchieri, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Integrazione delle Pompe di Calore in sistemi di climatizzazione complessi"

Responsabile scientifico ENEA: Francesco D'Annibale

Responsabile scientifico UNIBOLOGNA : Gian Luca Morini

Gli autori desiderano ringraziare la dott.ssa Anna Carmela Violante e l'ing. Giambattista Guidi di ENEA per il contributo sull'analisi LCA dei sistemi geotermici.

## Indice

SOMMARIO.....	5
1 INTRODUZIONE.....	6
2 LA MODELLAZIONE DELL'EDIFICIO CON ALMABUILD.....	6
2.1 DESCRIZIONE DEL TOOLBOX ALMABUILD.....	6
2.2 LA COSTRUZIONE DEL MODELLO DI UN EDIFICIO CON ALMABUILD.....	9
2.3 I BLOCCHI DELLA LIBRERIA ALMABUILD DEDICATI AI COMPONENTI DI INVOLUCRO.....	14
2.3.1 <i>Modellazione degli elementi opachi di involucro</i> .....	16
2.3.2 <i>Modellazione degli elementi trasparenti di involucro</i> .....	20
2.3.3 <i>Calcolo degli ombreggiamenti</i> .....	23
2.4 ZONE TERMICHE E BILANCI.....	24
2.5 CREAZIONE AUTOMATICA DEL MODELLO DINAMICO COMPLETO IN SIMULINK.....	29
2.6 SITO WEB DI ALMABUILD.....	30
3 ANALISI DI DIVERSE CONFIGURAZIONI IMPIANTISTICHE BASATE SU POMPE DI CALORE.....	33
3.1 POMPA DI CALORE DUAL SOURCE ARIA-TERRENO.....	33
3.1.1 <i>Background</i> .....	33
3.1.2 <i>Descrizione del caso studio e relativa modellazione</i> .....	33
3.1.3 <i>Discussione dei risultati</i> .....	35
3.2 MODELLAZIONE DINAMICA DI POMPE DI CALORE ACCOPPIATE A CAMPI FOTOVOLTAICI.....	37
3.2.1 <i>Background</i> .....	37
3.2.2 <i>Descrizione del caso studio</i> .....	37
3.2.3 <i>Discussione dei risultati</i> .....	38
3.3 UTILIZZO DELL'INERZIA TERMICA DELL'INVOLUCRO EDILIZIO PER DIMINUIRE I CONSUMI ENERGETICI DI UN IMPIANTO IN POMPA DI CALORE CON INTEGRAZIONE ELETTRICA.....	40
3.3.1 <i>Background</i> .....	40
3.3.2 <i>Descrizione del caso studio</i> .....	41
3.3.3 <i>Discussione dei risultati</i> .....	43
3.4 SISTEMA IBRIDO CON POMPA DI CALORE E CALDAIA.....	45
3.4.1 <i>Background</i> .....	45
3.4.2 <i>Modellazione del caso studio</i> .....	46
3.4.3 <i>Discussione dei risultati</i> .....	47
3.5 MODELLAZIONE DINAMICA DI POMPE DI CALORE POLIVALENTI.....	49
3.5.1 <i>Background</i> .....	49
3.5.2 <i>Descrizione del caso studio</i> .....	49
3.5.3 <i>Discussione dei risultati</i> .....	51
4 ANALISI DEL CICLO DI VITA (LCA) DI UN IMPIANTO GEOTERMICO: CASO STUDIO.....	53
4.1 INTRODUZIONE ALL'ANALISI LCA.....	53
4.2 CARATTERISTICHE FONDAMENTALI DELL'LCA.....	54
4.2.1 <i>Analisi di inventario (LCI)</i> .....	55
4.2.2 <i>Valutazione dell'impatto del ciclo di vita (LCIA)</i> .....	55
4.2.3 <i>Interpretazione dei dati</i> .....	56
4.3 CASO STUDIO: CONFRONTO SISTEMA GEOTERMICO GSHP E ASHP.....	56
4.4 RISULTATI ED INTERPRETAZIONE DEI DATI.....	57
5 CONCLUSIONI.....	58
6 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	60
7 APPENDICE A: BUS DI CONNESSIONE TRA BLOCCHI IN ALMABUILD.....	64
8 APPENDICE B: DESCRIZIONE DEI BLOCCHI DELLA LIBRERIA ALMABUILD.....	67

9 APPENDICE C: CURRICULUM SCIENTIFICO DEL GRUPPO DI LAVORO ..... 92

## Sommario

La linea di attività LA 3.11 ha prodotto lo sviluppo di uno strumento software in ambiente SIMULINK per la simulazione dinamica dei carichi termici delle utenze legati alle esigenze di riscaldamento, raffrescamento e produzione di ACS, in base alla tipologia di utenza, alle caratteristiche dell'abitazione e alle condizioni climatiche dei casi studio selezionati. Il software verrà messo a disposizione come libreria aperta di Simulink in una pagina dedicata all'interno del sito dell'Università di Bologna. Attraverso tale software e altri software dinamici commerciali (TRNSYS) sono state analizzate le prestazioni di diverse tipologie di impianti a pompa di calore. In particolare, si è studiato il comportamento di pompe di calore in grado di utilizzare diversi serbatoi termici esterni (aria e terreno). Si è poi analizzato in quali condizioni l'accoppiamento con campi fotovoltaici possa migliorare le prestazioni dei sistemi di condizionamento a pompa di calore. Si è quindi affrontato lo studio delle opportunità offerte dall'abbinamento di impianti a pompa di calore con emettitori ad elevata inerzia (pannelli radianti a tubi affogati nel massetto) nel cambiamento delle logiche di regolazione. Infine si sono analizzati gli impianti basati su sistemi di generazione ibridi ottenuti accoppiando caldaia e pompa di calore.

## 1 Introduzione

Al giorno d'oggi le pompe di calore rappresentano sistemi molto diffusi per il riscaldamento invernale, il raffrescamento estivo e la produzione di acqua calda sanitaria (ACS) per gli edifici. Gli alti rendimenti e la possibilità di sfruttare fonti energetiche rinnovabili (es. aria, terreno) rendono l'impiego di tali macchine adatto sia alle nuove costruzioni che a riqualificazioni energetiche di edifici esistenti.

La valutazione delle prestazioni energetiche di un impianto a pompa di calore abbinato ad un edificio passa attraverso una dettagliata modellazione degli elementi di involucro, dei carichi interni, dei contributi solari e dei tassi di infiltrazione e ricambio dell'aria nelle zone termiche. Inoltre, sempre più frequentemente le pompe di calore si trovano ad operare all'interno di impianti complessi, in cui sono accoppiate ad altri generatori di calore, come ad esempio caldaie a gas, resistenze elettriche, collettori solari termici. Esistono inoltre pompe di calore innovative in grado di sfruttare due diverse sorgenti di calore esterne, come aria e terreno, e pompe di calore in grado di soddisfare contemporaneamente la richiesta di energia frigorifera per il condizionamento estivo degli ambienti e la richiesta di energia termica per la produzione di ACS di un edificio.

Risulta quindi importante la valutazione delle prestazioni stagionali di tali sistemi attraverso simulazioni dinamiche, al fine di ricavare regole il più generali possibili per un dimensionamento ottimale dell'impianto e per il settaggio ideale dei parametri di controllo, che ne massimizzino l'efficienza e ne riducano il fabbisogno energetico. Inoltre, poiché le prestazioni delle pompe di calore, specialmente quelle che utilizzano come serbatoio termico esterno l'aria esterna, sono fortemente influenzate dalle condizioni climatiche e quindi risultano estremamente variabili durante l'anno. Ciò costringe ad effettuare delle simulazioni dinamiche annuali per una corretta valutazione delle prestazioni energetiche del sistema complessivo "edificio-impianto".

Esistono molti strumenti software commerciali che permettono uno studio dinamico dettagliato della fisica degli edifici. Tuttavia, molti dei software disponibili attualmente non sono di facile utilizzo da parte dei progettisti di impianti in quanto richiedono capacità di programmazione numerica che non rientrano normalmente nel bagaglio culturale dei tecnici. Inoltre, i software commerciali si presentano come "oggetti chiusi" che utilizzano moduli di calcolo preimpostati non facilmente modificabili o personalizzabili.

Al fine di poter disporre di uno strumento software flessibile e aperto per la simulazione dinamica degli impianti a pompa di calore si è deciso di sviluppare un software per la simulazione dinamica che operasse in ambiente SIMULINK attraverso l'utilizzo di una libreria di blocchi elementari mediante i quali poter modellare ogni edificio reale.

In un secondo momento, è stato utilizzato il software dinamico sviluppato con SIMULINK per analizzare diverse configurazioni di impianti a pompa di calore, ovvero sistemi a doppia sorgente (aria e terreno), sistemi con pompe di calore abbinate a caldaie a gas, resistenze elettriche o pannelli fotovoltaici e pompe di calore polivalenti in grado di sfruttare il calore di condensazione, prodotto durante il raffrescamento estivo, per la contemporanea produzione di ACS. Alcune delle configurazioni analizzate sono state simulate dinamicamente anche tramite il software commerciale TRNSYS 17. Sono state quindi ricavate regole che indicano in quali casi le diverse configurazioni studiate risultano vantaggiose e che permettono di massimizzare le prestazioni energetiche complessive delle diverse tipologie di impianto considerate.

## 2 La modellazione dell'edificio con ALMABuild

### 2.1 Descrizione del toolbox ALMABuild

ALMA Building Energy Simulation Toolbox (ALMABEST) è il toolbox sviluppato in ambiente Matlab-Simulink per la simulazione in regime dinamico di sistemi integrati edificio-impianto [1-8].

ALMABEST è composto da due librerie: ALMABuild e ALMAHVAC, utilizzate rispettivamente per la modellazione dell'involucro edilizio e dei principali componenti degli impianti HVAC. Sia ALMABuild che

ALMAHVAC sono composti da una serie di blocchi Simulink e da un insieme di interfacce grafiche per rendere più agevole il compito dell'utente (GUI).

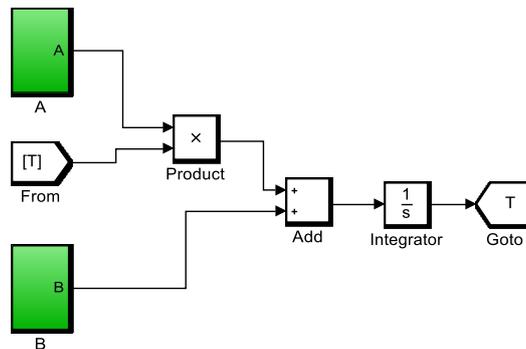
In questa relazione vengono descritte le principali caratteristiche di ALMABuild e delle librerie che lo compongono. La caratteristica principale del toolbox consiste nell'utilizzo di una serie di m-file sviluppati dagli autori che, appoggiandosi a diverse GUI, implementa automaticamente il modello dell'edificio all'interno dell'ambiente Simulink: gli m-file consentono infatti di richiamare automaticamente i blocchi di ALMABuild contenuti nella relativa libreria di Simulink. Tali blocchi vengono opportunamente collegati tra loro ed i loro parametri caratteristici vengono impostati in modo automatico. In questo modo la modellazione di un qualunque edificio, anche complesso, guidata dalle GUI diventa rapida e sicura, con una ridotta probabilità di commettere errori anche per utenti non esperti.

Simulink è un ambiente di programmazione grafica, sviluppato attraverso Matlab, nato per la modellazione di sistemi dinamici multi-dominio. La principale caratteristica di Simulink è la creazione di modelli dinamici mediante un linguaggio di programmazione intuitivo basato su una serie di blocchi che è possibile accoppiare tra loro grazie a collegamenti grafici. Simulink si basa su una libreria composta da blocchi di base e riuniti in gruppi (blockset). Ogni blockset è focalizzato su un aspetto specifico ed è composto da una serie di blocchi elementari: ad esempio, nel blockset Operazioni matematiche vengono raccolti tutti i componenti che consentono le principali operazioni matematiche (ovvero somma, sottrazione, prodotto e divisione) tra i segnali.

Simulink viene utilizzato principalmente per la sua capacità di risolvere facilmente sistemi di equazioni differenziali ordinarie dipendenti dal tempo. Ad esempio, equazioni espresse come:

$$\frac{dT}{dt} = AT + B \quad (1)$$

dove A e B sono coefficienti che possono dipendere da diversi parametri, possono essere facilmente gestite in Simulink usando una serie di blocchi elementari, come mostrato in Figura 1.



**Figura 1. Esempio di un semplice modello implementato in ambiente Simulink.**

Nel modello riportato in Figura 1, la variabile dipendente (segnale T) è l'uscita del blocco Integrator. T è collegato al blocco Product richiamando il suo valore dall'uscita del blocco Integrator tramite un blocco Goto collegato a un blocco From. In questo modo viene evitato il collegamento diretto tra i blocchi Integrator e Product e non sono presenti collegamenti grafici nel desktop Simulink. Inoltre, analizzando il modello riportato in Figura 1 si può osservare che sono presenti due tipi di blocchi: i componenti bianchi sono i blocchi elementari disponibili nella libreria Simulink, mentre i componenti verdi sono blocchi personalizzati, che l'utente può costruire a partire da blocchi elementari.

È possibile creare sottosistemi personalizzati e librerie personalizzate; in questo modo è possibile sviluppare un modello Simulink che collega blocchi originati da diverse librerie. In Simulink, un modello di edificio completo può essere facilmente ottenuto mediante blocchi rappresentativi dei diversi elementi

dell'edificio. Questa è l'idea principale di ALMABEST, in cui vengono utilizzati sottosistemi personalizzati per la modellazione di edifici e sistemi HVAC.

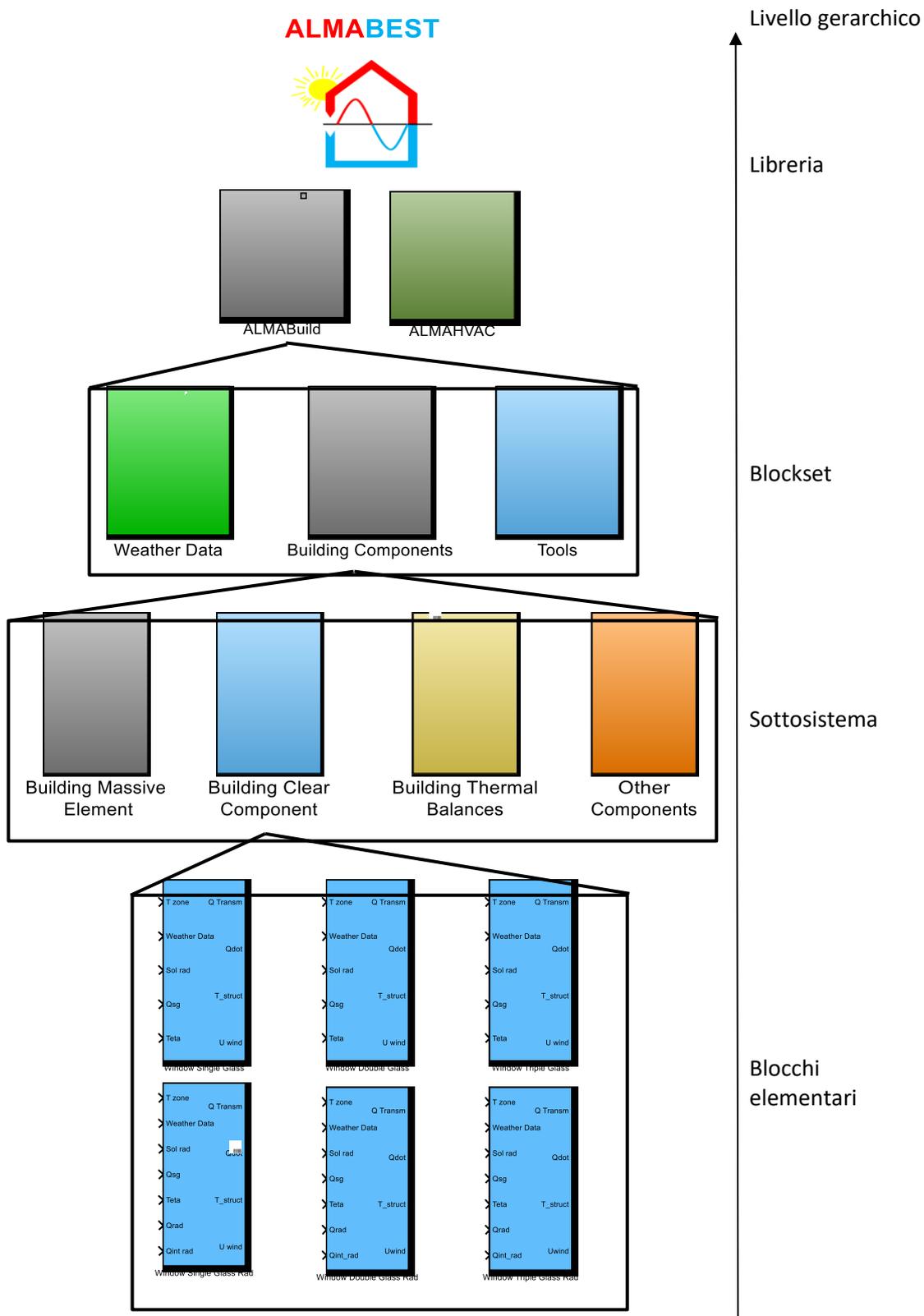


Figura 2. Livelli gerarchici di ALMABEST.

In Figura 2 si può apprezzare la struttura gerarchica di ALMABEST. Il toolbox sviluppato è composto da due librerie: ALMABuild, utilizzata per la modellazione degli edifici, e ALMAHVAC, adottata per le simulazioni dei componenti HVAC. Ogni libreria è costituita da blocchi dedicati ad aspetti specifici (ad es. raccolta dei dati meteorologici, bilancio termico degli elementi dell'involucro edilizio e così via), composti a loro volta da una serie di sottosistemi. Infine, ciascun sottosistema contiene un insieme di blocchi elementari correlati a specifici aspetti della modellazione degli edifici.

## 2.2 La costruzione del modello di un edificio con ALMABuild

A partire dai blocchi contenuti nella libreria ALMABEST (una panoramica della libreria ALMABEST è riportata nell'Appendice in fondo a questo report), il modello di un edificio accoppiato al suo sistema HVAC può essere implementato in Simulink selezionando dalla libreria una serie di specifici blocchi elementari, collegandoli correttamente tra loro, e impostando per ciascun blocco i parametri richiesti. In questo modo, l'utente può facilmente implementare nell'ambiente di lavoro Simulink il modello di un edificio complesso senza essere chiamato a sviluppare nuovi blocchi. Questo lavoro può essere svolto anche da utenti con competenze limitate sull'utilizzo di Simulink.

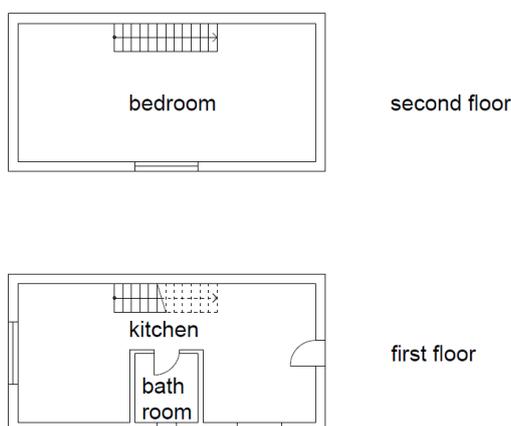


Figura 3. Pianta dell'edificio.

A titolo di esempio, si riporta in Figura 3 il modello dinamico realizzato con Simulink di un semplice edificio. Il fabbricato è composto da due piani; nel primo piano si trovano due zone termiche (es. bagno e cucina), mentre il secondo piano è costituito da una singola zona termica, ovvero la camera da letto.

In Figura 4 è rappresentato il modello dell'edificio considerato, implementato in ambiente Simulink tramite la libreria ALMABuild. È evidente che il modello dell'edificio è costruito attorno a quattro diversi tipi di sottosistemi:

- Il sottosistema Dati climatici (in verde);
- I sottosistemi della zona termica (in giallo);
- Il sottosistema Intersezioni (in rosso);
- Il sottosistema HVAC (in bianco).

Nel sottosistema Dati climatici i dati meteorologici, come la temperatura dell'aria esterna, la velocità del vento e la radiazione solare incidente, vengono valutati e aggregati in segnali bus definiti.

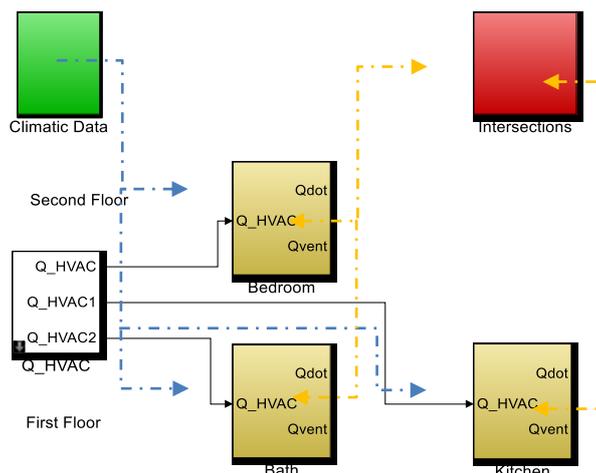


Figura 4. Modello Simulink dell’edificio sviluppato per mezzo di ALMABuild.

Nel sottosistema Zona termica viene risolto il bilancio termico della zona e vengono calcolati la temperatura interna ed i flussi di calore afferenti l’interno della zona termica. Al contrario, il sottosistema Intersections consente di modellare lo scambio termico attraverso gli elementi dell’involucro che separano diverse zone termiche (vale a dire le pareti divisorie tra bagno e cucina ed il soffitto che divide il primo piano dal secondo). Infine, il sottosistema HVAC contiene il modello dell’impianto di riscaldamento. Osservando la Figura 4, si possono notare due tipi di connessioni fra i blocchi. I fili neri solidi vengono utilizzati per una connessione diretta tra due sottosistemi: questo è il caso del sottosistema HVAC, le cui porte di uscita sono collegate alle porte di ingresso dei sottosistemi della zona termica, determinando l'accoppiamento tra l'edificio e l'impianto. Al contrario, i fili tratteggiati presenti in Figura 4 (non presenti in realtà sul foglio di lavoro Simulink) evidenziano le connessioni eseguite usando i blocchi Goto e From. Come rappresentato in figura, i blocchi Goto e From vengono ad esempio utilizzati per condividere i dati meteorologici definiti nel sottosistema Dati climatici con i sottosistemi delle varie zone termiche. Quando si modella un qualunque edificio per mezzo di ALMABuild, i blocchi Goto e From sono ampiamente utilizzati, al fine di eliminare dal foglio di lavoro Simulink una serie di connessioni tra i blocchi inutili per la comprensione del modello. In questo modo, la chiarezza del modello viene preservata. Nel modello di edificio rappresentato in Figura 4, i segnali scambiati tra i blocchi tramite collegamento diretto (fili pieni) o mediante i blocchi From e Goto (linee tratteggiate) sono generalmente costituiti da molte variabili. A causa dell'enorme numero di informazioni richieste dai blocchi ALMABEST, i segnali scambiati tra i blocchi sono raggruppati in una serie di "bus" personalizzati. In questo modo, è possibile ottenere un layout chiaro del modello dell’edificio realizzato in ambiente Simulink. I principali segnali bus utilizzati in ALMABuild sono elencati in Tabella 1 insieme alle informazioni generali che essi forniscono.

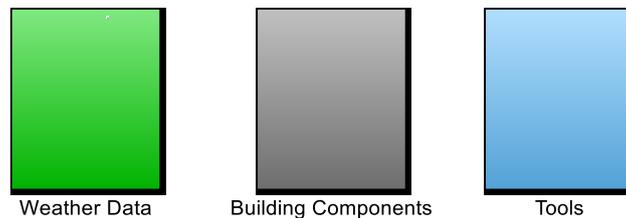
Tabella 1. Segnali bus di ALMABuild

Nome del segnale bus	Informazioni contenute
Weather Data Bus	Condizioni ambiente
Sun bus	Condizioni del Sole
Solar Radiation Bus	Componenti della radiazione incidente
Temperature zone bus	Temperatura dell’aria e temperatura media radiante della zona termica
Superficial temperature bus	Temperatura superficiale interna ed esterna dell’elemento dell’involucro edilizio
Power bus	Flussi termici
Ventilation bus	Flusso termico e portata in massa dovuti alla ventilazione

Come si può vedere dalle informazioni riportate in Tabella 1, ogni bus raccoglie informazioni relative a un particolare aspetto fisico (ad es. condizioni esterne, flussi di calore...) o ad un componente dell'edificio (ad es. elementi dell'involucro, zona termica...). Al fine di garantire la possibilità di collegare altre librerie Simulink con ALMABuild, nella libreria del toolbox sono disponibili blocchi di conversione in grado di tradurre il bus standard degli altri applicativi Simulink in bus ALMABuild e viceversa: in questo modo è possibile accoppiare ALMABuild con altri strumenti basati su Simulink, rimuovendo tutti i vincoli alla diffusione di questo nuovo strumento.

Il toolbox ALMABuild, rappresentato in Figura 5, è composto da tre sottoblocchi principali: dati climatici, componenti dell'edificio e strumenti.

Il blocco dei dati meteorologici è costituito da componenti utili per il calcolo di variabili meteorologiche, come la radiazione solare incidente, o per il caricamento di dati meteorologici esterni (come ad esempio il Test Reference Year di un sito specifico) nel progetto Simulink. Il blockset componente generico dell'involucro edilizio è composto da modelli dinamici elementari di elementi dell'involucro (pareti, tetti, finestre ...). Infine, i blocchi necessari per la valutazione delle condizioni di comfort in una zona termica e altri componenti utilizzati per la modellazione dell'edificio vengono raccolti nel blockset Strumenti.



**Figura 5. Livello principale del toolbox ALMABuild.**

Il modello dinamico di un edificio, anche se semplice, è sempre ottenuto utilizzando un gran numero di blocchi. In Figura 6 sono mostrati gli elementi coinvolti per la modellazione di una zona termica generica (camera da letto di un appartamento). Per realizzare il modello di una zona termica, una serie di blocchi collegati ai singoli elementi dell'involucro (pareti, tetto ...) vengono utilizzati insieme a un blocco in grado di calcolare i flussi di calore che avvengono fra gli elementi della zona. In ALMABuild, poiché i blocchi relativi a diverse tipologie di elementi dell'involucro richiedono dati diversi (ad es. stratigrafia delle pareti o proprietà ottiche degli elementi di una finestra) e ciascun elemento differisce in termini di esposizione (cioè interna, esterna o a contatto con il suolo), inclinazione (cioè verticale, o orizzontale) e area, è necessario impostare una grande quantità di parametri per ciascun blocco elementare che compone il modello dell'edificio. Come mostrato in Figura 6, sul foglio di lavoro Simulink un modello completo è caratterizzato da un gran numero di blocchi e connessioni per mezzo delle quali i dati vengono scambiati tra i blocchi. Pertanto, la possibilità di commettere errori durante l'implementazione manuale di blocchi e connessioni diventa molto alta.

Questi tipi di problemi sono comuni agli strumenti per le simulazioni energetiche dinamiche basate sull'ambiente Simulink. In ALMABuild, l'introduzione dei dati di input dell'edificio è ottenuta mediante Graphical User Interfaces (GUI), sviluppato in Matlab. Tuttavia, il vantaggio principale di ALMABuild è che la creazione del modello Simulink è completamente automatizzata. Inoltre, in ALMABuild sono state sviluppate una serie di interfacce specifiche per consentire all'utente di modificare i dati di input, aggiungendo o cancellando elementi o zone termiche.



dati meteorologici dal database METEONORM o, solo per l'Italia, dal database CTI selezionando la posizione dell'edificio. Inoltre, l'utente può definire l'albedo solare della posizione.

In questo modo, tutte le informazioni meteorologiche vengono importate dal relativo database e raccolte in una struttura Matlab, denominata Ambient Data. Le informazioni raccolte in questa struttura sono gestite dai blocchi elementari che compongono il blockset di ALMABuild relativo ai dati climatici (Weather\_Data). Come mostrato in Figura 8, il blocco Weather\_Data è composto da due tipi di elementi: lettore (lettore di dati meteorologici e di radiazioni solari) e calcolatrice (con il quale è possibile calcolare l'irraggiamento solare incidente su una qualunque superficie).

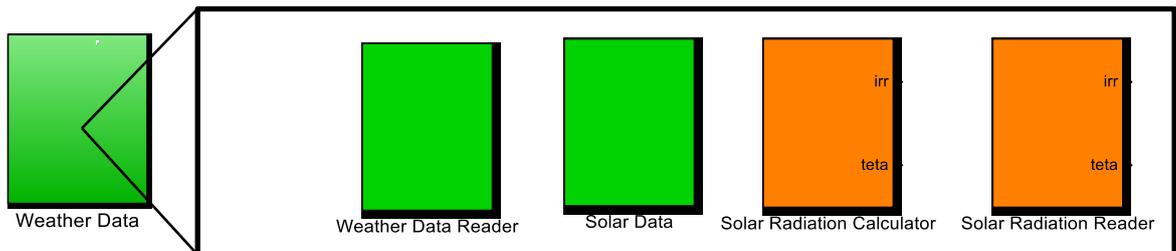


Figura 8. Blockset dei Dati climatici all'interno di ALMABuild.

I blocchi di calcolo vengono utilizzati per la valutazione del profilo annuale della radiazione solare incidente istantanea per ciascun orientamento (definito nella GUI relativa all'orientamento di ciascun componente) degli elementi dell'involucro. Questo calcolo viene eseguito una volta durante la creazione del modello dell'edificio ed i risultati ottenuti vengono aggiunti alla struttura Ambient\_Data. In questo modo, il valore dei dati climatici può essere creato in un progetto Simulink mediante una serie di blocchi "lettori" che interagiscono con la struttura Ambient\_Data, come mostrato in Figura 9. Per un modello specifico, la creazione del blocco Dati climatici consente di calcolare e raccogliere nella struttura Ambient\_Data tutti i parametri meteorologici utili per il bilancio termico di ciascuna zona. Il calcolo di tutte le quantità di interesse viene eseguito in un unico passaggio per l'intero periodo della simulazione (ovvero un anno). In questo modo, lo sforzo computazionale durante la simulazione dinamica del comportamento dell'edificio viene ridotto, poiché la radiazione solare incidente e tutti gli altri dati climatici sono già disponibili come dati di input per l'intera durata della simulazione.

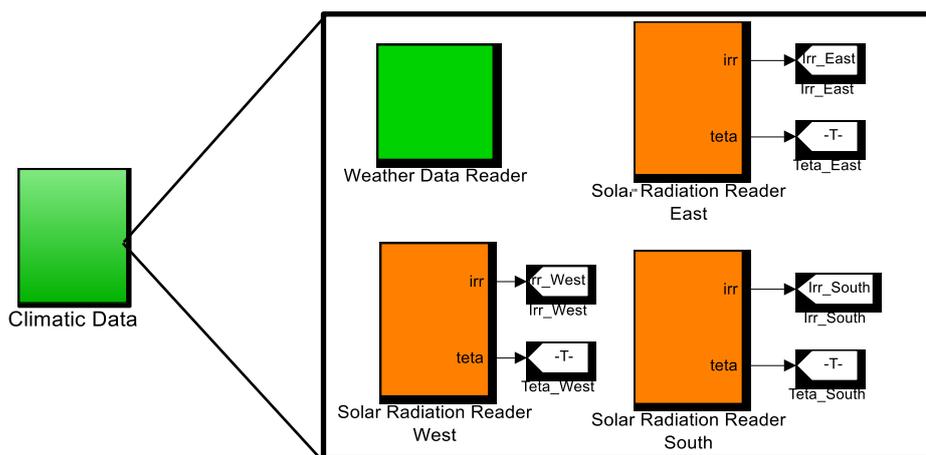


Figura 9. Blocco dei Dati climatici per un edificio caratterizzato da tre orientamenti diversi.

### 2.3 I blocchi della libreria ALMABuild dedicati ai componenti di involucro

Seguendo il layout dell'interfaccia principale di ALMABuild (riportato in Figura 7), dopo la selezione dei dati meteorologici, le strutture, ovvero gli elementi massivi dell'involucro edilizio che compongono l'edificio possono essere definite mediante la GUI della struttura rappresentata in Figura 10.

Come si può vedere in Figura 10, è necessario definire le caratteristiche di ciascun elemento massivo dell'involucro e selezionare la sua tipologia tra le seguenti categorie:

- Muro esterno;
- Parete interna, ovvero una parete tra due zone termiche adiacenti;
- Partizione interna, ovvero un muro all'interno di una zona termica;
- Soffitto (o pavimento interno);
- Tetto.

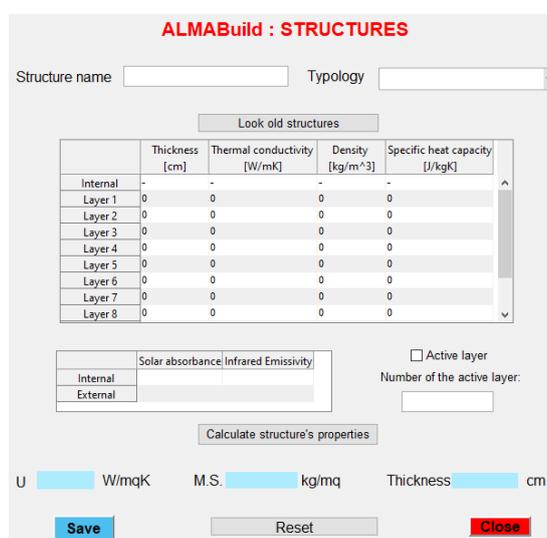


Figura 10. GUI utilizzata per la definizione delle principali caratteristiche degli elementi massivi dell'involucro edilizio.

In seguito, è possibile definire la stratigrafia degli elementi ed i coefficienti di scambio termico convettivo e radiativo; da questi dati vengono calcolati la trasmittanza termica, la massa superficiale e lo spessore totale dell'elemento.

Il pavimento su terreno, che non è elencato tra le categorie definite nella GUI della struttura, è descritto mediante una GUI dedicata in cui, oltre ai dati richiesti per ogni altro elemento massivo, è possibile inserire le informazioni necessarie per la valutazione delle proprietà termo-fisiche dell'elemento: è necessario definire la trasmittanza termica equivalente al pavimento, ottenuta seguendo la procedura di calcolo descritta nella norma EN ISO 13370 [9].

La modellazione dinamica degli edifici viene generalmente ottenuta considerando tutti gli elementi dell'involucro presenti in una zona termica. Ogni elemento di involucro è caratterizzato da un'inerzia termica specifica (cioè pareti, finestre), proprietà ottiche (un elemento potrebbe essere trasparente o opaco alla radiazione solare) e sono coinvolti tutti e tre i meccanismi di trasferimento del calore (conduzione, convezione e radiazione). In molti casi il numero di elementi coinvolti nella definizione di una zona termica può essere molto elevato ma, nonostante la complessità dei problemi fisici in questione, è necessario che le simulazioni energetiche degli edifici siano veloci e computazionalmente efficienti per poter essere utilizzate in simulazioni lunghe (un anno o più), in algoritmi di controllo predittivo e per eseguire ottimizzazioni multi-obiettivo.

In letteratura, molti modelli di edifici sono disponibili secondo varie tecniche: alcuni di essi richiedono il monitoraggio di dati all'interno di una zona termica, mediante il quale vengono sviluppati modelli statistici basati su varie tecniche come la rete neuronale artificiale, macchine a vettori di supporto e regressione

lineare multipla, mentre altri si basano su equazioni derivate da leggi fisiche. All'interno delle tecniche del modello fisico, uno degli approcci più utilizzati per simulare il trasferimento di calore negli edifici è l'utilizzo di modelli basati su resistenze termiche (R) e capacità termiche (C). Questi modelli, noti come modelli RC, etichettati in base al numero di resistenze termiche e capacità considerate, richiedono poco sforzo computazionale e sono caratterizzati da semplicità e trasparenza. All'interno di questi modelli, è possibile individuare due diverse categorie: i modelli Lumped Parameters Whole Room (LPWR) e i modelli Lumped Parameters Construction Element (LPCE).

Nei modelli LPWR il comportamento termico di una zona viene valutato mettendo insieme tutta la zona, ottenendo il minor sforzo computazionale e di conseguenza il minor tempo di simulazione. Ad esempio, nel 1987 Crabb et al. [10] hanno proposto un modello 3R2C per la simulazione di una zona termica: una resistenza termica tiene conto delle perdite di calore dovute alla conduzione all'interno di elementi di involucro leggeri e alla ventilazione, mentre le restanti due resistenze termiche sono utilizzate per la modellizzazione delle perdite di calore componenti pesanti; le due capacità termiche sono correlate alla capacità termica delle strutture dell'edificio e dell'aria nella zona termica. Nel 1993, Tindale [11] ha suggerito un modello in serie del terzo ordine (ciò significa che vengono prese in considerazione tre capacità) al fine di migliorare la precisione rispetto al modello 3R2C quando si considerano edifici pesanti. Tuttavia, più recentemente Nielsen [12] ha sviluppato un modello 2R2C che dimostra che un modello del secondo ordine è sufficientemente preciso per una rapida valutazione delle prestazioni energetiche di un edificio nelle prime fasi della progettazione dell'edificio. Inoltre, la norma EN ISO 13790 [13] ha proposto un metodo basato su un modello del primo ordine, il modello 5R1C, che è stato adottato come riferimento da diversi ricercatori. Anche se sono stati suggeriti alcuni aggiornamenti a questo modello, alcuni ricercatori hanno sottolineato l'incoerenza del modello per l'analisi dell'uso intermittente di sistemi di riscaldamento e raffreddamento e per gli elementi pesanti dell'involucro edilizio.

D'altra parte, nei modelli LPCE ogni elemento massivo d'involucro è descritto per mezzo di un modello RC e una zona termica è modellata aggregando singoli modelli RC. Anche in questo caso si possono trovare modelli di diversi ordini: Lorenz e Masy [14] hanno proposto nel 1982 un modello 2R1C, Gouda et al. [15] hanno migliorato questo modello con un modello 3R2C, Mara et al. [16] hanno aumentato nuovamente il numero di capacità suggerendo un modello 6R3C e infine Fraisse et al. [17] hanno derivato da un modello 3R2C un modello del quarto ordine, 3R4C. La discretizzazione degli elementi massivi per la valutazione delle resistenze termiche e delle capacità dei modelli sopra menzionati viene effettuata mediante regole analitiche in tutti i casi, ad eccezione del modello 3R2C proposto da Gouda et al. [15] In questo caso, i cinque parametri richiesti sono stimati mediante un algoritmo di ottimizzazione che minimizza le discrepanze della risposta termica della parete valutate attraverso un modello di riferimento del ventesimo ordine e un modello di ordine ridotto (secondo ordine). Si stima che la risposta termica di una parete imponga un disturbo graduale sia della temperatura esterna che del flusso di calore interno. Più recentemente, Underwood [18] ha suggerito un aggiornamento dell'algoritmo di ottimizzazione per la valutazione dei parametri del modello 3R2C: il modello di riferimento viene risolto con un rigoroso metodo alle differenze finite. In questo algoritmo di ottimizzazione, le sollecitazioni continue in entrambi i lati del muro sono considerate contemporaneamente. Di conseguenza, è necessario un algoritmo multi-obiettivo per la stima dei parametri del modello, poiché le discrepanze della risposta termica della parete devono essere ridotte sia sul lato interno che su quello esterno.

Infine, nella nuova norma EN ISO 52016 [19], che sostituisce la EN 13790 per la valutazione del rendimento energetico dell'edificio, viene proposto un modello LPCE RC. Questo modello consiste nella descrizione di elementi opachi con un modello generale 4R5C, che viene ridotto a un modello del primo ordine (la capacità è diversa da zero solo in un nodo) se la massa è concentrata sul lato interno o esterno. Solo nel caso di elementi con massa equamente distribuita, tutti i nodi del modello 4R5C hanno capacità superiori a zero.

In ALMABuild, è stato implementato un metodo LPCE per la descrizione dell'edificio poiché è stato riconosciuto che i modelli LPWR non sono adatti per la valutazione delle prestazioni energetiche dell'edificio e per la valutazione delle condizioni di comfort interno. Ciò è confermato dalla sostituzione della norma EN 13790, basata su LPWR, con la EN ISO 52016, che propone un modello LPCE. In effetti, i

modelli LPWR non forniscono informazioni essenziali, come la distribuzione della temperatura superficiale dei diversi elementi costruttivi di una zona termica, ora richiesta anche nella fase preliminare di progettazione di un edificio NZEB.

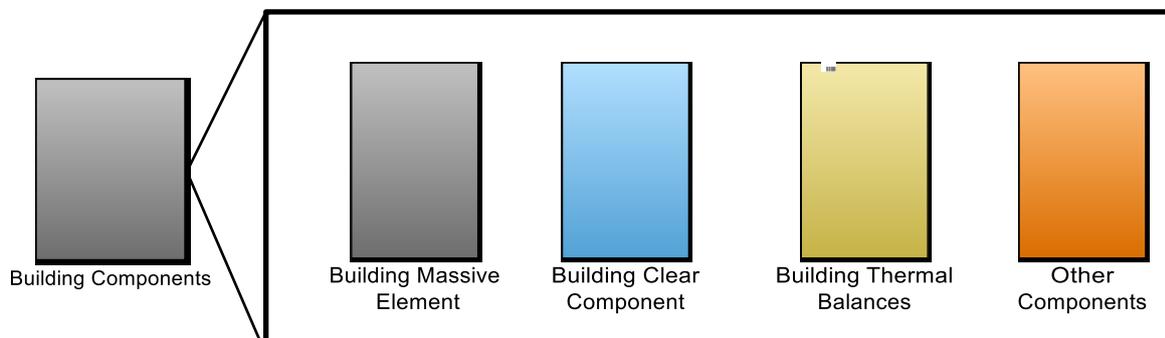


Figura 11. Blocchi che compongono il blockset *Building Components*.

I modelli LPCE utilizzati per la descrizione dell'edificio in ALMABuild sono raccolti nel blockset Building Components. Come mostrato nella Figura 11, questo blocco è costituito a sua volta da quattro tipi di blocchi: il blocco Building Massive Element (BME), il blocco Building Clear Component (BBC), il blocco Building Thermal Balance (BTB) e il blocco Altri componenti.

### 2.3.1 Modellazione degli elementi opachi di involucro

Il sottosistema Building Massive Element (BME) è composto da blocchi elementari utilizzati per la modellazione di elementi opachi dell'involucro, come pareti, tetti e pavimenti, secondo un modello 3R4C. Confrontando questo modello con i modelli LPCE recentemente proposti, si possono trovare due differenze rilevanti: prima di tutto, il modello implementato in un blocco BME è un modello del quarto ordine anziché un modello di ordine ridotto; in secondo luogo, la stima dei parametri si basa su una nuova procedura analitica per la discretizzazione di strutture multistrato. Un modello del quarto ordine è preferibile rispetto ad un modello di ordine ridotto secondo l'analisi condotta da Fraisse et al. [17], che hanno evidenziato come un modello del secondo ordine non sia abbastanza accurato nella valutazione della temperatura superficiale di entrambi i lati di una parete quando si considera la variazione della temperatura interna. Come descritto nella sezione precedente, nei recenti modelli LPCE proposti la stima dei parametri viene effettuata mediante algoritmi di tuning basati su approcci di ottimizzazione. Al contrario, nel modello 3R4C implementato in ALMABuild, è stata sviluppata una nuova procedura analitica per la discretizzazione di strutture multistrato con l'obiettivo di ottenere valori più significativi dei parametri, senza richiedere l'esecuzione di ulteriori simulazioni considerando diversi modelli o diverse piattaforme computazionali. La procedura analitica per il calcolo delle resistenze termiche e delle capacità del modello 3R4C implementato nel blocco BME consiste nella determinazione della posizione dei quattro nodi in un elemento multistrato, come rappresentato nella Figura 12.

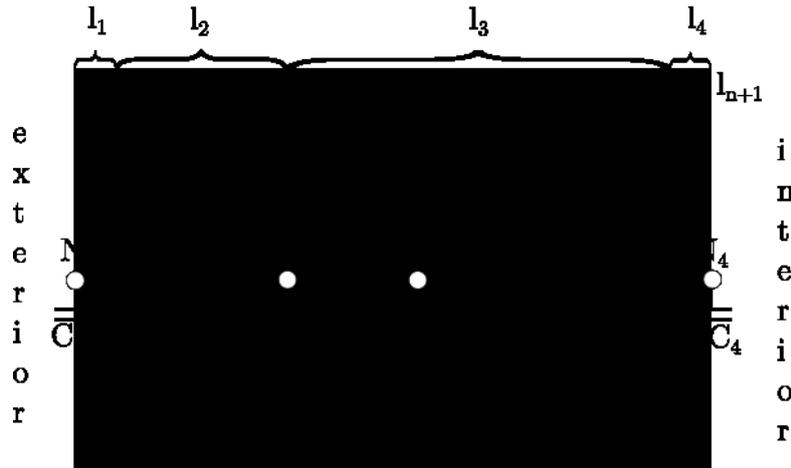


Figura 12. Schema equivalente 3R4C associato ad un elemento opaco d'involucro.

Come mostrato nella Figura 12, il primo e l'ultimo nodo sono posizionati sulla superficie esterna e interna del muro, mentre il secondo e il terzo nodo sono posizionati all'interno del muro.

Più in dettaglio, i nodi 2 e 3 sono posizionati rispettivamente all'interfaccia tra lo strato isolante e lo strato massivo e nella posizione in cui viene raggiunto il primo quarto della capacità termica totale della parete, a partire dal lato esterno.

Conoscendo il numero di strati di parete ( $nl$ ) e le proprietà fisiche ( $\rho_i, c_i$ ) e lo spessore ( $d_i$ ) di ciascun  $i$ -esimo strato di parete, è possibile calcolare la capacità termica totale della parete ( $C_{tot}$ ), mediante la relazione:

$$C_{tot} = \sum_{i=1}^{nl} \rho_i c_i d_i \quad (2)$$

La posizione ( $x_c$ ) e lo strato di parete ( $l_c$ ) in cui viene raggiunto il primo quarto della capacità termica totale della parete possono essere identificati tramite la seguente relazione:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^j \rho_i c_i d_i + \rho_{j+1} c_{j+1} x_{j+1} = C_{tot} / 4; & j \in [1, nl-1], x_{j+1} \in [0, d_{j+1}] \\ l_c = j+1; & x_c = \sum_{i=1}^j d_i + x_{j+1} \end{cases} \quad (3)$$

dove gli strati sono contati a partire dallo strato di parete esterno ( $i=1$ ).

La posizione dell'isolamento termico si trova confrontando la conducibilità termica di ogni strato di parete:

$$l_{is} : \lambda(l_{is}) = \min(\lambda(l_j)); j \in [1, nl] \quad (4)$$

Ora, la posizione dei nodi interni  $N_2$  e  $N_3$  può essere ottenuta come:

$$\begin{cases} N_2 = \min \left( \sum_{i=1}^{l_{is}} d_i, \sum_{i=1}^{l_c-1} d_i + x_{j+1} \right) \\ N_3 = \max \left( \sum_{i=1}^{l_{is}} d_i, \sum_{i=1}^{l_c-1} d_i + x_{j+1} \right) \end{cases} \quad (5)$$

Dopo aver determinato la posizione dei quattro nodi della rete RC, le resistenze termiche che collegano due nodi adiacenti ( $R_j$ ) vengono calcolate come la somma delle resistenze termiche degli strati BME che sono contenuti fra i due nodi considerati, mentre la capacità termica di un nodo è calcolata come la somma della metà della capacità termica degli strati adiacenti al nodo.

In ALMABuild, tutti i componenti massivi di involucro sono descritti tramite questo modello 3R4C, ad eccezione dei pavimenti su terreno. I pavimenti su terreno sono modellati mediante la suddetta rete 3R4C in cui il nodo esterno, che si affaccia sul terreno, è collegato a una rete RC aggiuntiva, come rappresentato in Figura 13. Questa rete aggiuntiva è composta da tre nodi capacitivi, che rappresentano i primi 0,5 m di profondità del suolo (strati di terreno) e un nodo non capacitivo, che descrive uno strato virtuale. Il terreno e gli strati virtuali compongono il modello 3R3C utilizzato per tenere conto del comportamento dinamico del terreno sotto il pavimento, in accordo con l'allegato F della norma EN ISO 13370.

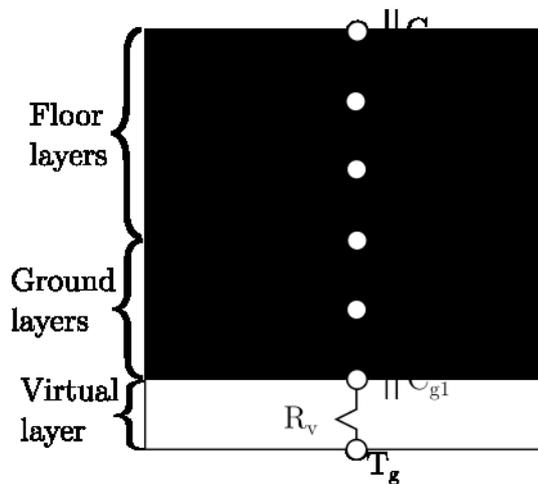


Figura 13. Schema RC per un pavimento su terreno.

I due strati di terreno sono equamente distribuiti in una profondità di terreno di 0,5 m, il che significa che ogni strato ha uno spessore di 0,25 m. La capacità termica e la resistenza termica degli strati di terreno sono valutate come per il modello 3R4C. Al contrario, la resistenza termica dello strato virtuale ( $R_v$ ) è stimata mediante:

$$R_v = \frac{1}{U} - R_{si} - R_f - R_g \quad (6)$$

dove  $U$  è la trasmittanza termica equivalente del pavimento,  $R_{si}$  è la resistenza superficiale interna,  $R_f$  è la resistenza termica totale degli strati del pavimento e  $R_g$  è la resistenza termica di 0,5 m di terreno. Il nodo non capacitivo rappresenta il terreno indisturbato ed è caratterizzato da una temperatura costante,  $T_g$ , impostata come la temperatura esterna media annuale.

Se l'elemento massivo d'involucro contiene uno strato attivo (come nel caso di pavimento, soffitto o parete radiante), un nodo capacitivo aggiuntivo viene inserito nella rete RC in corrispondenza del centro dello strato attivo. Come rappresentato in Figura 14, un apporto di calore interno insiste su questo nodo, che rappresenta la potenza erogata dal sistema HVAC al nodo.

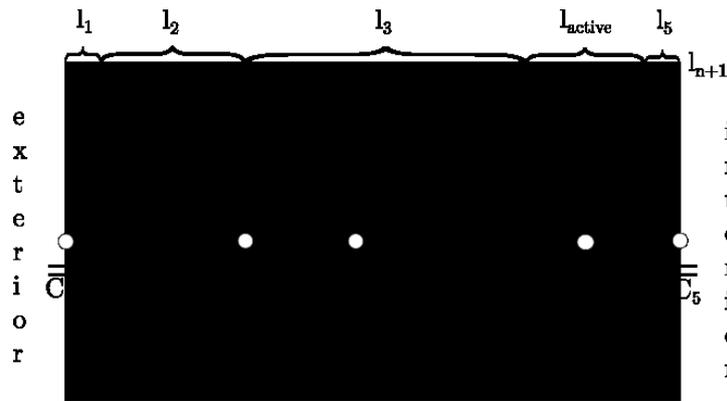


Figura 14. Schema RC equivalente per un elemento opaco con uno strato attivo ( $l_{active}$ ).

Va notato che le equazioni utilizzate per la modellazione di elementi massivi mediante il blocco BME riguardano solo i meccanismi di trasferimento di calore attraverso le pareti. Non sono stati sviluppati modelli per l'analisi dei meccanismi di trasferimento di massa attraverso gli elementi d'involucro. Ciò significa che in ALMABuild l'analisi dei fenomeni di trasmissione del vapor d'acqua può essere considerata solo in modo molto semplificato. Ad ogni modo, poiché è riconosciuta l'importanza dei meccanismi di trasferimento di massa attraverso le pareti per le valutazioni del rischio di condensazione dell'acqua e per la valutazione delle condizioni di comfort dell'aria interna, lo sviluppo di modelli per l'analisi dei fenomeni di trasferimento di massa è previsto in futuro.

Nei blocchi BME, come mostrato in Figura 15, il trasferimento di calore per convezione e irraggiamento tra la superficie esterna dell'elemento e l'ambiente esterno sono valutati considerando il rispettivo coefficiente di scambio termico secondo EN 6946 [20], mentre il trasferimento di calore radiativo tra superficie esterna dell'elemento e il cielo è valutato in accordo alla UNI 11300-1 [21] come:

$$\begin{cases} \varphi_{sky} = h_r F_r (T_e - T_{sky}) \\ h_r = \varepsilon \sigma_0 \frac{(T_e + 273)^4 + (T_{sky} + 273)^4}{T_e - T_{sky}} \\ F_r = \frac{1 + \cos \beta}{2} \end{cases} \quad (7)$$

dove  $h_r$  è il coefficiente di scambio termico radiativo per extraflusso,  $F_r$  è il fattore di vista della superficie esterna dell'elemento verso il cielo,  $T_{sky}$  è la temperatura del cielo,  $\varepsilon_s$  è l'emissività dell'elemento,  $\sigma_0$  è la costante di Stefan-Boltzmann e  $\beta$  è la pendenza dell'elemento d'involucro.

Anche il trasferimento di calore per convezione tra la superficie interna di un elemento d'involucro e l'ambiente interno viene valutato considerando il coefficiente di scambio termico convettivo riportato nella norma EN 6946. Il trasferimento di calore radiativo è calcolato diversamente in due diversi modelli. Nel primo modello, il trasferimento di calore radiativo tra la superficie interna di un elemento d'involucro e l'ambiente interno viene valutato adottando il coefficiente di scambio termico radiativo per superfici interne in accordo con la EN 6946. Al contrario, il secondo modello si basa sul calcolo dei fattori di vista tra le superfici interne della zona termica; in questo caso il trasferimento di calore radiativo interno è un dato di input e deve essere selezionato il modello radiativo dettagliato.

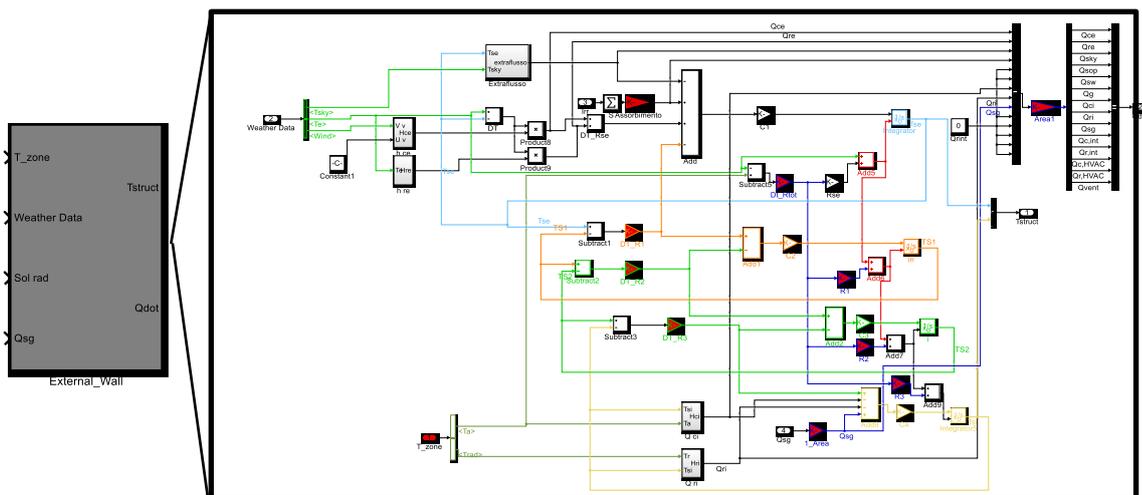


Figura 15. Blocco BME di una parete esterna.

Nei blocchi BME, il flusso di calore esterno dovuto alla radiazione solare è dato dal prodotto della somma dei tre componenti della radiazione solare incidente col coefficiente di assorbimento dell'elemento dell'involucro, mentre il flusso di calore solare interno dovuto alla radiazione solare che viene trasmessa da elementi trasparenti è un dato di input del blocco.

Poiché gli elementi massivi dell'involucro possono essere superfici passive o attive, possono avere un'esposizione diversa e di conseguenza diverse condizioni al contorno (cioè i muri possono dividere la zona termica dall'ambiente esterno o da altre zone termiche, mentre i pavimenti possono essere in contatto con il suolo...) e poiché è possibile selezionare diversi modelli (ovvero modelli radiativi semplici o dettagliati), nella libreria ALMABuild si possono trovare diversi blocchi BME.

Tuttavia, tutti questi blocchi richiedono quasi gli stessi dati di input e forniscono gli stessi output. Come mostrato in Figura 15, che rappresenta il blocco BME per una parete esterna, sono necessari quattro ingressi e due sono le uscite. Il primo ingresso è il *Temperature zone bus* che è composto dalla temperatura dell'aria e dalla temperatura media radiante della zona termica; mentre il secondo input è il *Weather Data bus*. Il terzo input richiesto è il *Solar Radiation Bus*, che raccoglie i tre componenti della radiazione solare incidente sulla superficie considerata e, infine, l'ultimo input è rappresentato dalla radiazione solare trasmessa dagli elementi trasparenti della zona termica che colpisce la superficie interna dell'elemento di involucro considerato.

Le uscite di un blocco BME sono il *Superficial temperature bus*, che contiene la temperatura superficiale esterna e interna dell'elemento di involucro descritto dal blocco e il *Power bus*, in cui compaiono i valori di tutti i flussi termici sia del lato esterno che interno dell'elemento.

### 2.3.2 Modellazione degli elementi trasparenti di involucro

Analogamente a quanto fatto per la simulazione degli elementi massivi dell'involucro, sono state sviluppate interfacce grafiche per l'inserimento dei dati relativi alle finestre che compongono un edificio. Come si può vedere in Figura 16, per ciascuna finestra è necessario definire un'etichetta, la trasmittanza termica totale dell'infilso ed il numero di vetri che compongono l'elemento trasparente. In base al numero di vetri, le tabelle della GUI relativa alle finestre vengono modificate.

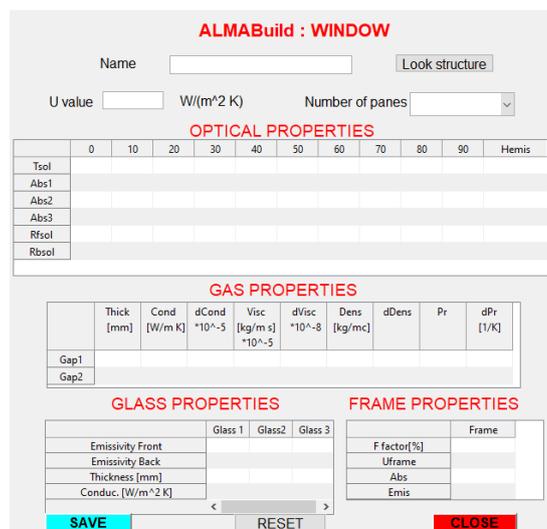


Figura 16. GUI dedicata alla definizione degli elementi trasparenti dell'involucro edilizio.

L'utente può inserire tutti i dati relativi alla dipendenza delle proprietà ottiche dei vetri dall'angolo di incidenza della radiazione solare (descritte in Tabella 2), le proprietà termo-fisiche del gas posto nell'intercapedine tra due vetri (riportate in Tabella 3), dei vetri (riportate in Tabella 4) e del telaio (descritte in Tabella 5). Contrariamente agli elementi massivi opachi descritti in precedenza, per i quali le proprietà termiche di ogni strato sono dati comunemente riportati nelle schede tecniche dei produttori, le proprietà ottiche degli elementi che compongono una finestra devono essere valutate mediante un software dedicato come WINDOW. Poiché le finestre possono essere accoppiate con elementi aggiuntivi come persiane e tende, sono state sviluppate ulteriori GUI dedicate all'inserimento dei dati relativi a questi elementi.

Tabella 2. Proprietà ottiche di una finestra

Variabile	Descrizione
Tsol	Fattore di trasmissione solare
Abs 1	Fattore di assorbimento solare
Rfsol	Coefficiente di riflessione della superficie esterna
Rbsol	Coefficiente di riflessione della superficie interna

Tabella 3. Proprietà termo-fisiche del gas nell'intercapedine

Variabile	Descrizione
Thick	Spessore dell'intercapedine
Cond	Conducibilità termica del gas
dCond	Derivata della conducibilità termica rispetto alla temperatura
Visc	Viscosità del gas
dVisc	Derivata della viscosità rispetto alla temperatura
Dens	Densità del gas
dDens	Derivata della densità rispetto alla temperatura
Pr	Numero di Prandtl del gas
dPr	Derivata del numero di Prandtl rispetto alla temperatura

Tabella 4. Proprietà termo-fisiche del vetro

Variabile	Descrizione
Emissivity front	Emissività infrarossa della superficie esterna
Emissivity front	Emissività infrarossa della superficie interna
Thickness	Spessore del vetro
Conductance	Conduttanza termica del vetro

**Tabella 5. Proprietà termo-fisiche del telaio.**

Variabile	Descrizione
<b>F factor</b>	Fattore di telaio (percentuale telaio su totale finestra)
<b>Uframe</b>	Trasmittanza termica del telaio
<b>Abs</b>	Coefficiente di assorbimento solare del telaio
<b>Emis</b>	Emissività infrarossa del telaio

I blocchi Building Clear Component (BCC) sono i blocchi elementari che compongono il sottosistema Building Clear Component rappresentato in Figura 2. I blocchi BCC contengono il modello fisico di elementi di costruzione trasparenti (cioè finestre). Poiché una finestra è composta da diversi materiali con diverse proprietà termiche e ottiche, i blocchi BCC sono composti da diversi modelli fisici. Più precisamente, i blocchi BCC includono modelli di: (i) telaio, (ii) vetro e (iii) gas contenuto nell'intercapedine tra due vetri.

Il telaio è modellato mediante una rete RC di ordine ridotto, simile a quella utilizzata nei BME: due nodi capacitivi (situati sulla superficie interna ed esterna del telaio) e una singola resistenza termica costituiscono il modello 1R2C. Gli stessi flussi termici considerati nel blocco BME sono presi in considerazione nel modello del telaio, ad eccezione del flusso termico per apporto solare, che viene trascurato.

Il comportamento termico della frazione trasparente di una finestra è modellato in un blocco BCC per mezzo di modelli di vetro e gas, uniti in una singola rete RC. In ALMABuild, ogni tipologia di finestra (vetro singolo, doppio o triplo) è modellata con una rete RC personalizzata. Una rete 1R2C viene utilizzata per la modellazione di finestre a vetro singolo e doppio. Per la finestra a vetro singolo, le due capacità si trovano sulla superficie esterna e interna del vetro, consentendo la valutazione della temperatura delle superficie interna ed esterna.

Al contrario, nella rete 1R2C per la finestra a doppio vetro i nodi si trovano al centro di ciascun vetro, in questo modo è possibile valutare l'andamento dinamico della temperatura di ciascun vetro. Infine, per una tripla finestra, la temperatura di ciascun vetro è ottenuta considerando un modello 2R3C, in cui di nuovo i nodi capacitivi si trovano al centro di ciascun vetro.

Va notato che, contrariamente ai principali strumenti WBES in cui viene trascurata l'inerzia termica della finestra, per mezzo della rete RC di BCC si tiene conto della capacità termica di ciascun vetro, anche se bassa. Pertanto, per le finestre a doppio e triplo vetro, la capacità di ciascun nodo è la capacità termica totale del vetro modellato, mentre per la finestra a vetro singolo le due capacità sono impostate pari a metà della capacità totale della finestra.

Le resistenze termiche, come per il blocco BME, collegano due nodi adiacenti e, ad eccezione del caso di una finestra a vetro singolo, sono correlate al trasferimento di calore radiativo e convettivo nell'intercapedine del gas, trascurando la conduzione nel vetro. Il coefficiente di scambio termico radiativo viene valutato considerando lo scambio di calore radiativo tra due lastre infinite grigie:

$$h_{rad} = \frac{(T_m + 273)^3 4\sigma_0}{\frac{1}{\varepsilon_{s1}} + \frac{1}{\varepsilon_{s2}} - 1} \tag{8}$$

dove  $T_m$  è la temperatura media dei vetri che delimitano l'intercapedine,  $\sigma_0$  è la costante di Stefan-Boltzmann e  $\varepsilon_s$  è l'emissività dei vetri.

Il coefficiente di scambio termico convettivo viene determinato mediante il "gas-cavity model". In ALMABuild viene adottata la correlazione sperimentale proposta da Elsherbiny [22] per il numero di Nusselt per le finestre verticali:

$$Nu = \left[ 1 + (0.0303Ra^{0.402})^{11} \right]^{0.091} \text{ for } Ra < 2 \times 10^5 \tag{9}$$

Considerando l'espressione dei coefficienti di scambio termico radiativo e convettivo nell'intercapedine di gas, si può notare che dipendono dalla temperatura del vetro, che non è costante durante le simulazioni. Di conseguenza, contrariamente agli elementi massivi d'involucro, le finestre sono caratterizzate da una trasmittanza termica variabile nel tempo.

Le finestre sono componenti trasparenti, il che significa che trasmettono una frazione della radiazione solare incidente verso la zona termica. Inoltre, una frazione della radiazione solare incidente viene assorbita dai vetri. La valutazione del comportamento ottico è operata considerando l'assorbimento solare di ciascun vetro, la trasmittanza solare e il coefficiente di riflessione solare verso l'esterno e verso l'interno dell'intero sistema finestre, composto da più vetri. Tutti questi parametri sono funzione dell'angolo di incidenza, ma è necessario anche il loro valore medio sul range 0-90° per stimare correttamente il comportamento ottico di una finestra con la radiazione solare diffusa. Va notato che, poiché ciascun vetro assorbe una frazione della radiazione solare incidente, i nodi della rete RC sono caratterizzati da un termine di sorgente aggiuntivo per tener conto di questo flusso termico. Lo scambio termico convettivo e radiativo con l'esterno e l'interno e lo scambio termico radiativo per extraflusso sono valutati come per i blocchi BME.

In Figura 17, che rappresenta il blocco BCC di una finestra a doppio vetro, si possono apprezzare gli input e gli output richiesti da un blocco BCC. I primi quattro ingressi sono gli stessi di un blocco BME: la *Temperature zone bus* è il primo output, seguito da *Weather Data bus*, da *Solar Radiation Bus* e dalla radiazione solare secondaria che colpisce la superficie interna della finestra. L'ultimo input richiesto è l'angolo di incidenza della radiazione solare, poiché le proprietà ottiche della finestra dipendono da esso.

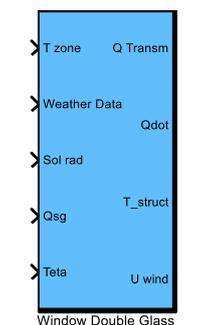
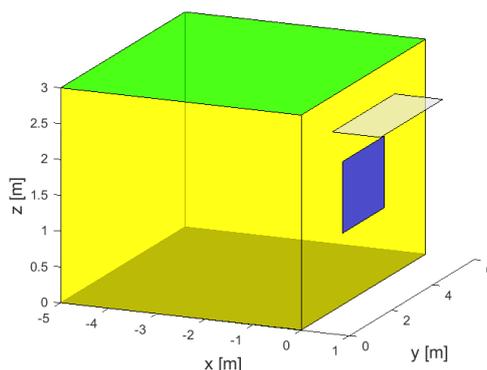


Figura 17. Blocco BCC per finestra a doppio vetro.

Quattro sono gli output di un blocco BCC: il primo, *Q Transm*, è un vettore composto dalla radiazione solare diretta e diffusa trasmessa dalla finestra alla zona termica. Questa uscita è direttamente collegata al *Direct Distribution block*, presente nel blockset *Other Components*, che viene utilizzato per la valutazione della quota della radiazione solare entrante che colpisce la superficie interna di ciascun elemento di involucro della zona termica. Il secondo e il terzo output sono il *Power bus* e il *Superficial temperature bus*, composto dalla temperatura superficiale della parte trasparente di una finestra, poiché generalmente è la parte principale di una finestra. Infine, l'ultimo output è la trasmittanza termica della finestra che, come osservato in precedenza, non è un valore costante ma cambia dinamicamente, in funzione della temperatura del vetro.

### 2.3.3 Calcolo degli ombreggiamenti

Come riportato in Figura 7, ALMABuild è caratterizzato dalla presenza di GUI anche per la definizione di ombreggiamenti che possono influenzare gli elementi dell'involucro edilizio, in particolare le finestre. Tramite l'interfaccia dedicata, l'utente può definire la geometria dell'oggetto, verificando la geometria grazie ad una rappresentazione grafica dell'edificio e del dispositivo di ombreggiamento in base ai dati inseriti: in Figura 18 si riporta un esempio di un oggetto orizzontale applicato ad un edificio realizzato per mezzo del toolbox.



**Figura 18. Rappresentazione grafica di un edificio con un dispositivo di ombreggiamento orizzontale (in grigio), ottenuto dalla GUI degli ombreggiamenti di ALMABuild.**

Al fine di ridurre lo sforzo computazionale necessario per effettuare una simulazione energetica dinamica, come per la valutazione della radiazione solare incidente sulle superfici dell'edificio, anche il calcolo del fattore di ombreggiamento annuale viene automaticamente eseguito da uno script Matlab una sola volta, durante l'implementazione del modello di edificio nell'ambiente Simulink. L'utente può scegliere di discretizzare il calcolo del fattore di ombreggiatura annuale con passo temporale giornaliero: il calcolo può essere eseguito per ogni giorno dell'anno o per giorni rappresentativi (ad esempio un giorno ogni una o due settimane). Per ogni giorno selezionato, il calcolo del fattore di ombreggiamento viene eseguito considerando un intervallo di tempo di 10 minuti. Il profilo di ombreggiamento annuale calcolato per mezzo dello script Matlab viene archiviato, insieme ad altre informazioni relative all'elemento di involucro interessato dall'oggetto selezionato, in una struttura Matlab. In questo modo, il profilo del fattore di ombreggiamento annuale è un dato di input che viene importato in ambiente Simulink dallo spazio di lavoro Matlab.

#### 2.4 Zone termiche e bilanci

Una volta definita la posizione dell'edificio da simulare e calcolati i relativi dati meteorologici, è possibile inserire le proprietà termo-fisiche di tutti gli elementi dell'involucro edilizio, sia opachi che trasparenti, e le caratteristiche di eventuali dispositivi di ombreggiamento che agiscono sulle zone termiche in cui è suddiviso l'edificio. A questo scopo, è stata sviluppata una serie ulteriore di GUI dedicate.

In primo luogo, è necessario definire il numero di piani che compongono l'edificio ed assegnare ad ognuno di essi la relativa etichetta, a partire dal piano terra. In seguito, per ciascun piano, è possibile definire le etichette delle zone termiche situate nel piano considerato. Infine, l'utente può inserire le proprietà principali di ciascuna zona termica, tramite la GUI rappresentata in Figura 19.

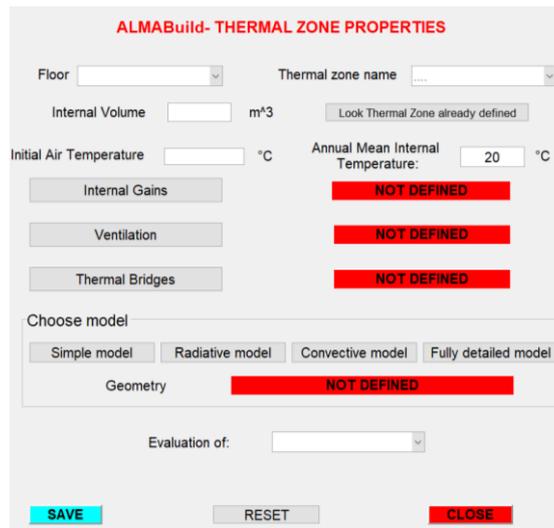


Figura 19. GUI relativa alle proprietà della zona termica.

Come evidenziato nella figura soprastante, viene utilizzato un menu a comparsa per la selezione della zona termica di cui si vogliono definire le caratteristiche e si possono impostare il volume d'aria interno alla zona stessa ed il valore iniziale della temperatura dell'aria interna. Il profilo degli apporti termici interni, i dati relativi alla ventilazione ed i ponti termici vengono invece inseriti mediante GUI dedicate. Inoltre, come si può notare dall'interfaccia riportata in Figura 19, l'utente può selezionare la metodologia di calcolo per mezzo della quale viene simulato il comportamento della zona termica. Il modello più semplice è quello che viene comunemente utilizzato dai principali software di simulazione dinamica e permette di calcolare in maniera semplificata la temperatura convettiva e la temperatura radiante della zona; il modello radiativo, più complesso del primo, viene utilizzato per la stima della distribuzione spaziale della temperatura radiante all'interno della zona termica. Il modello convettivo, come quello radiante, viene utilizzato per la determinazione della distribuzione spaziale della temperatura dell'aria, tenendo conto dei flussi d'aria convettivi. Infine, viene adottato il modello più dettagliato, denominato "fully detailed mode" per la stima della distribuzione spaziale sia della temperatura radiante che di quella convettiva. Infine, tramite un menu a comparsa, l'utente può selezionare la tipologia di valutazione che deve essere eseguita per la zona termica considerata: è possibile valutare la temperatura che si registra all'interno della zona termica in assenza di impianti di riscaldamento oppure la potenza ideale che un sistema HVAC dovrebbe fornire all'ambiente interno per garantire un profilo di temperatura dell'aria impostato dall'utente. Quest'ultima opzione è disponibile solo per il modello di calcolo semplice o radiativo.

Sulla base della metodologia di calcolo selezionata dall'utente per la simulazione energetica dell'edificio, sono necessarie informazioni diverse sulla geometria delle varie zone termiche. A titolo di esempio, in Figura 20 è rappresentata la GUI per l'inserimento dei dati geometrici nel caso in cui venga selezionato il modello di calcolo semplice. In figura si può notare che la zona termica è definita specificando per ogni elemento dell'involucro, caratterizzato dalla sua tipologia, dal suo orientamento e dalla sua area, che deve essere calcolata manualmente.

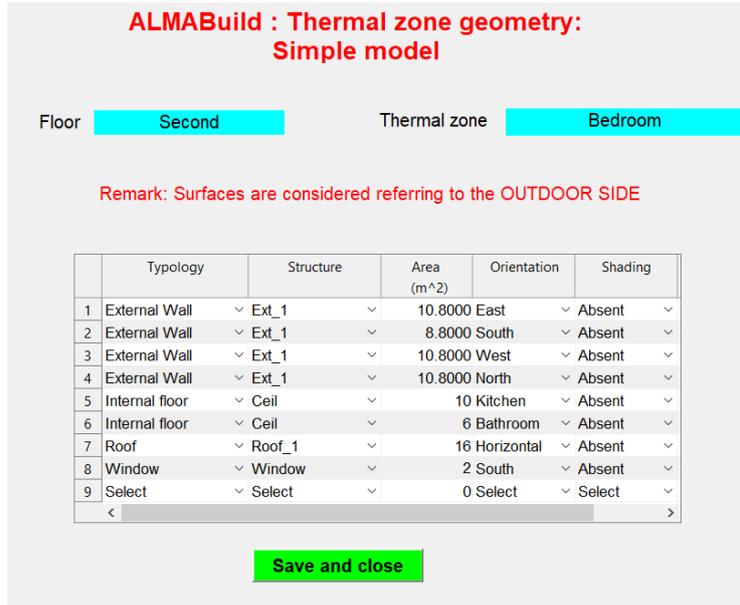


Figura 20. GUI per l’inserimento dei dati geometrici della zona termica per il modello semplice.

Come osservato in precedenza, la modellazione di una zona termica in ALMABuild è realizzata adottando il modello LPCE. In questa tipologia di modelli, gli edifici sono trattati simulando il comportamento dinamico di tutti i suoi elementi di involucro, valutando i flussi termici che influenzano ciascun elemento di involucro e calcolandone la temperatura superficiale mediante equazioni del tipo:

$$q_{cd,j} + q_{conv,j} + q_{sg,j} + q_{rad,j} = C_{si,j} \frac{dT_{si,j}}{dt} \quad j \in [1, N] \quad (10)$$

dove  $q_{cd,j}$  è il flusso termico per unità di area dovuto alla conduzione attraverso l'elemento j-esimo,  $q_{conv,j}$  e  $q_{rad,j}$  sono i flussi termici convettivo e radiativo tra la superficie interna dell'elemento j-esimo e l'ambiente interno,  $q_{sg,j}$  è la potenza correlata agli apporti solari, mentre  $C_{si,j}$  e  $T_{si,j}$  sono la capacità termica e la temperatura della superficie interna dell'elemento j-esimo. In ogni caso, i modelli LPCE richiedono un'equazione aggiuntiva per la stima della temperatura dell'aria, che in generale viene valutata come:

$$Q_v + Q_{conv} + Q_{HVAC} + Q_{int} = C_a \frac{dT_a}{dt} \quad (11)$$

dove  $Q_v$  è la potenza termica dovuta alla ventilazione,  $Q_{conv}$  è quella correlata allo scambio termico convettivo con la superficie interna degli elementi dell'involucro,  $Q_{HVAC}$  è la potenza fornita da un sistema HVAC,  $Q_{int}$  è la potenza dovuta agli apporti interni, mentre  $C_a$  e  $T_a$  sono la capacità termica e la temperatura dell'aria.

Pertanto, la descrizione di una zona termica composta da  $N$  elementi di involucro è costituita da  $N$  equazioni (10) più un'equazione (11). Comunque, il numero di variabili incognite è  $N + 2$ :  $N$  temperature superficiali  $T_{si}$ , la temperatura dell'aria  $T_a$  e la potenza fornita dal sistema HVAC,  $Q_{HVAC}$ . Pertanto, è necessario fissare una variabile per risolvere il bilancio termico di una zona. Se viene fissata la temperatura dell'aria, è possibile calcolare la potenza ideale richiesta al sistema HVAC per garantire la temperatura dell'aria prescelta. Al contrario, se viene impostata la potenza fornita dal sistema HVAC, è possibile stimare la temperatura dell'aria della zona termica risolvendo l'insieme di  $N + 1$  equazioni.

In ALMABuild, l'insieme di  $N$  equazioni relative agli elementi di involucro di una zona termica viene implementato mediante blocchi BME e BCC, mentre l'equazione relativa alla temperatura dell'aria della

zona viene implementata in blocchi elementari del sottosistema Building Thermal Balance (BTB), dove viene risolto il bilancio termico della zona aggregando informazioni relative alle  $N$  equazioni per gli elementi di involucro. Poiché è possibile selezionare diversi tipi di modelli tramite la GUI della zona termica, nella libreria ALMABuild è possibile trovare diversi blocchi BTB.

Utilizzando il blocco BTB *simple model*, il bilancio termico di una zona viene risolto secondo un modello a due stelle: un modello a una stella viene utilizzato per il calcolo della temperatura convettiva mentre un secondo modello è relativo alla temperatura radiante della zona. Il modello a stella che rappresenta il bilancio termico dei flussi convettivi della zona termica è mostrato in Figura 21.

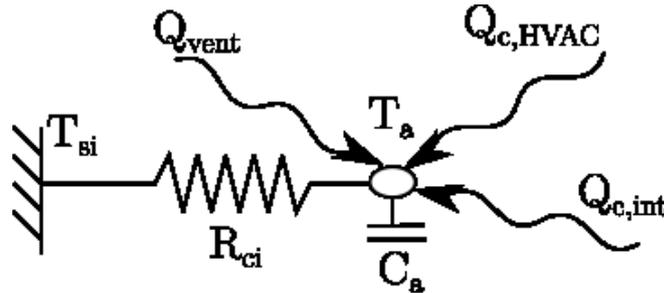


Figura 21. Modello a stella per il bilancio dei flussi convettivi.

In questa figura è possibile vedere che il nodo convettivo è capacitivo e che tutti i flussi di calore convettivi della zona termica insistono su di esso: (i) lo scambio termico convettivo fra la superficie interna di ciascun elemento d'involucro con l'ambiente interno ( $Q_{ci}$ ); (ii) lo scambio termico per ventilazione e/o infiltrazioni d'aria ( $Q_{vent}$ ) e (iii) la frazione convettiva della potenza erogata dal sistema HVAC ( $Q_{c,HVAC}$ ) e (iv) degli apporti interni ( $Q_{c,int}$ ).

Dallo schema a stella rappresentato in Figura 21, l'equazione di bilancio termico dei flussi convettivi può essere scritta come:

$$\sum Q_{ci} + \sum Q_{vent} + \sum Q_{c,HVAC} + \sum Q_{c,int} = \rho_a c_a V \frac{dT_a}{dt} \quad (12)$$

Dall'equazione (12) è possibile vedere come la temperatura convettiva della zona dipenda dalla capacità termica dell'aria, espressa come prodotto della densità dell'aria ( $\rho_a$ ), della capacità termica specifica dell'aria ( $c_a$ ) e del volume netto della zona termica ( $V$ ). È importante notare che la temperatura convettiva valutata con l'equazione (12) ha il significato fisico di temperatura dell'aria della zona termica, ipotizzando una distribuzione omogenea della temperatura all'interno della zona.

D'altra parte, la temperatura radiante stimata per mezzo del modello a stella rappresenta la temperatura media radiante valutata al centro della zona termica. In Figura 22(a) è rappresentato uno schema a delta che rappresenta lo scambio di calore radiativo tra tre superfici. In questa figura è possibile notare che ciascuna superficie è connessa alle altre mediante resistenze termiche. I valori di queste resistenze termiche dipendono non solo dal coefficiente di scambio termico radiativo, ma anche dai fattori di vista tra le superfici. Tuttavia, poiché il calcolo dei fattori di vista richiede molto tempo e necessita della definizione completa della geometria della zona termica, mediante le coordinate del confine di ciascuna superficie, lo schema a delta viene sostituito dalla rete a stella, rappresentata nella Figura 22(b).

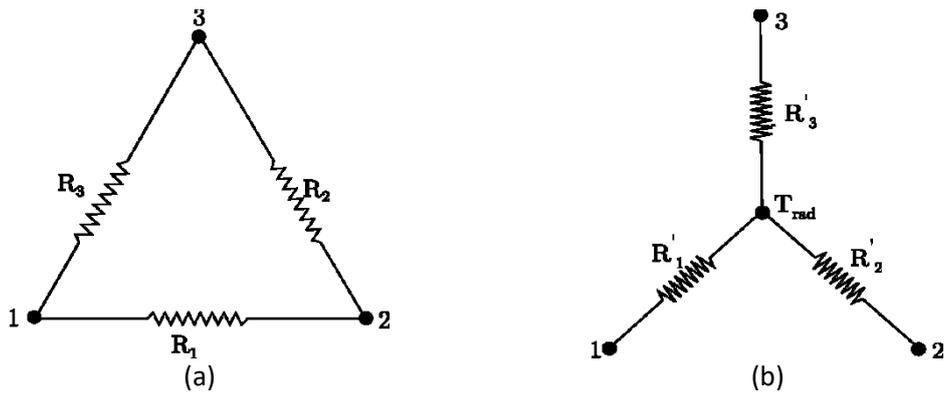


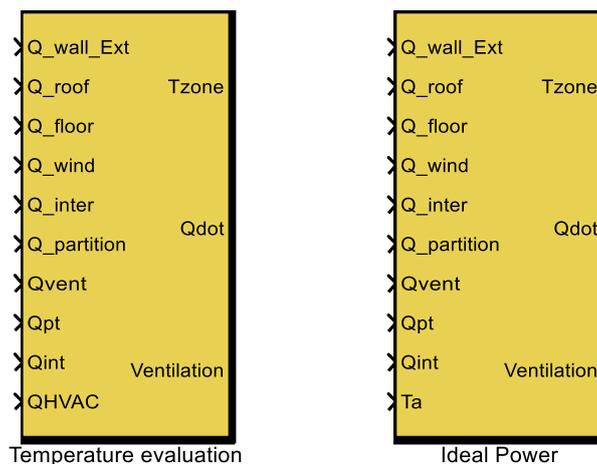
Figura 22. Scambio radiativo fra 3 superfici, schema a delta (a) e a stella (b).

Per mezzo di questo schema, ogni superficie è caratterizzata solo dallo scambio di calore col nodo centrale della rete a stella, che rappresenta la temperatura media radiante della zona. Come rappresentato nella figura, le resistenze termiche che collegano ciascuna superficie al nodo centrale (\$R'\_i\$) sono diverse da quelle dello schema a delta; in realtà, le resistenze termiche della rete a stella (\$R'\_i\$) dipendono solo dal coefficiente di scambio termico radiativo, poiché il fattore di vista tra una superficie e il nodo centrale è pari a 1. In questo modo, il calcolo dei fattori di vista non è richiesto. Va notato che la trasformazione delta-stella fornisce risultati esatti solo per uno schema a tre superfici, mentre per più superfici i risultati della rete a stella sono approssimazioni dei risultati esatti ottenuti con lo schema a delta. Tuttavia, è stato dimostrato che per l'analisi dello scambio radiativo tra le superfici degli edifici la rete a stella è soddisfacente. La temperatura media radiante viene calcolata risolvendo il bilancio termico per flussi radiativi della zona termica:

$$\sum Q_{ri} + \sum Q_{r,HVAC} + \sum Q_{r,int} = \frac{dT_r}{dt} \quad (13)$$

Dall'equazione sopra si può vedere che la temperatura radiante dipende solo dai flussi di calore radiativi della zona termica causati dal sistema HVAC, dagli apporti interni e dallo scambio termico con le superfici degli elementi di involucro. Inoltre, l'equazione (13) evidenzia che non viene presa in considerazione la capacità termica, poiché, come rappresentato in Figura 22(b), il nodo radiativo non è capacitivo. Tuttavia, va osservato che, per problemi numerici, nel blocco BTB di ALMABuild viene considerata una piccola capacità termica anche per il nodo radiativo, che non influisce sulla soluzione.

In Figura 23 sono rappresentati due blocchi BTB che implementano il modello di bilancio termico semplice. Gli input di questi blocchi sono la somma dei *Power Bus* relativi a diverse tipologie di elementi di edifici o flussi termici. Ad esempio, il primo ingresso di entrambi i blocchi è la somma del *Power Bus* relativo alle pareti esterne, mentre il secondo input è riferito ai tetti. In questo modo, per mezzo del *Power Bus*, ciascun blocco BME e BCC è collegato al blocco BTB, implementando il set di  $N + 1$  equazioni necessarie per risolvere il bilancio termico della zona, come descritto sopra.



**Figura 23. Blocchi BTB per il calcolo, mediante modello semplice, della temperatura della zona termica (blocco di sinistra) e della potenza ideale in condizioni termiche fissate (blocco di destra).**

Gli ingressi dei blocchi BTB non sono solo correlati agli elementi d’involucro, ma anche ai diversi tipi di flussi termici. Ad esempio, il settimo e il nono ingresso sono relativi al *Ventilation Bus* e al *Power bus* degli apporti interni. Tuttavia, confrontando gli ingressi di questi blocchi, si può osservare che l'ultimo ingresso è diverso: il blocco a sinistra in Figura 23, chiamato *Temperature evaluation*, richiede come input il *Power bus* relativo al sistema HVAC, mentre il blocco BTB sulla destra, chiamato *Ideal Power*, utilizza come input la temperatura dell'aria, che deve essere impostata. Ciò è dovuto al fatto che, come descritto in precedenza, per risolvere il bilancio termico della zona, è necessario fissare la temperatura dell'aria o la potenza fornita alla zona termica dal sistema HVAC. Pertanto, nel blocco BTB *Temperature evaluation*, la temperatura dell'aria e la temperatura radiante sono calcolate mediante le equazioni (12) e (13), mentre nel blocco *Ideal Power*, la frazione convettiva del sistema HVAC, necessaria per mantenere la temperatura dell'aria al valore di set point impostato dall'ultimo input, viene valutata per mezzo dell'equazione (12). Al contrario, nel blocco *Ideal Power* la temperatura radiante, che non è impostata dall'ultimo input, viene calcolata tramite l'equazione (13) e la componente radiativa della potenza del sistema HVAC è impostata pari a zero. Infine, come si può apprezzare dalla Figura 23, entrambi i blocchi BTB hanno gli stessi output: *Temperature zone bus*, *Power bus* della zona termica e *Ventilation bus*.

## 2.5 Creazione automatica del modello dinamico completo in SIMULINK

I dati inseriti dall'utente riguardanti i dati climatici, gli elementi dell'involucro edilizio e le zone termiche dell'edificio vengono raccolti in due strutture Matlab tramite il pulsante "SALVA TUTTI I DATI" dell'interfaccia principale di ALMABuild, come rappresentato in Figura 7. Come descritto in precedenza, i dati climatici vengono raccolti nella struttura *Climatic\_Data*, mentre tutte le informazioni sugli elementi dell'involucro edilizio e le zone termiche vengono raccolte nella struttura *Building\_Data*.

Come ultimo step, il modello dinamico dell'edificio può essere implementato nell'ambiente Simulink semplicemente tramite il comando CREATE THE MODEL dell'interfaccia principale di ALMABuild. In primo luogo, il calcolo relativo alla radiazione solare incidente su una qualunque superficie ed alla valutazione dei fattori di ombreggiamento vengono eseguiti automaticamente ed i valori ottenuti vengono aggiunti rispettivamente alle strutture *Ambient\_Data* e *Building\_Data*. In questo modo lo sforzo computazionale, e di conseguenza il tempo richiesto per le simulazioni, è ridotto, poiché le informazioni su ombreggiamenti e radiazione solare devono solo essere richiamate come dati e non ricalcolate di volta in volta.

A questo punto, tramite una serie di m-file, il modello dinamico dell'edificio viene implementato in ambiente Simulink, importando tutti i blocchi necessari dalla libreria di ALMABuild, collegandoli correttamente tra di loro e impostando per ciascun di essi i parametri corretti, in base ai dati precedentemente inseriti dall'utente. In questo modo, la creazione del modello dell'edificio sul foglio di lavoro è totalmente automatica, rendendo la sua implementazione più veloce rispetto all'inserimento

manuale dei dati e riducendo drasticamente gli errori dovuti all'inserimento di valori sbagliati o al collegamento errato fra blocchi. Inoltre, va sottolineato che tutta la procedura necessaria per la modellazione di edifici con ALMABuild non richiede alcuna esperienza di Simulink da parte dell'utente.

## 2.6 Sito web di ALMABuild

Il tool ALMABuild sarà scaricabile gratuitamente dal sito internet, di prossima apertura: <https://site.unibo.it/almabuild/it>, di cui un estratto è riportato in Figura 24.

Gli utenti interessati (ingegneri, architetti, professionisti del settore, ricercatori, studenti...) potranno apprendere diverse informazioni utili sul software, ad esempio come funziona ALMABuild (Figura 25), i primi passi dell'utente attraverso le interfacce grafiche (Figura 26), l'implementazione dei diversi elementi di involucro (Figura 27), la scelta del modello delle zone termiche (Figura 28), perché scegliere ALMABuild rispetto ad altri software dinamici (Figura 29).

Saranno inoltre presenti esempi di progetti realizzati con ALMABuild, un'agenda con gli eventi inerenti il tool e la lista dei contatti a cui potersi rivolgere.

Il sito web permetterà un'ampia diffusione del programma, che, essendo open, potrà essere ulteriormente sviluppato con l'aggiunta di nuovi blocchi di libreria anche da parte degli utenti stessi.



ALMA MATER STUDIORUM  
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

# ALMABUILD - ENERGY BUILDING DYNAMIC SIMULATION TOOL FOR SIMULINK

HOME
WHAT IS ALMABUILD? ▾
WHY ALMABUILD?
PROJECTS
DOWNLOAD
AGENDA
CONTACT US
AUTHORS

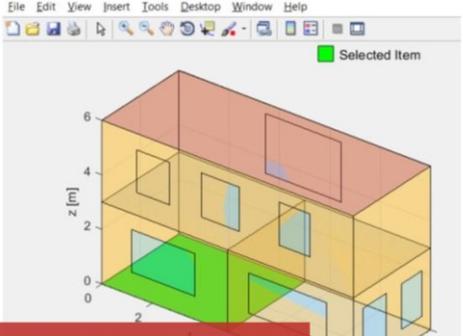
**ALMABuild : Thermal zone geometry: Simple model**

Floor: Floor\_1 Thermal zone: Cucina

Remark: Surfaces are considered referring to the OUTDOOR SIDE

Name	Typology	Structure	Area (m <sup>2</sup> )	Orientation	Shading
1_GROUND_FLOORS3	Floor	Select ▾	20	Select ▾	Select ▾
2_ADJ_CEILING405	Ceiling	Select ▾	20	Marsenne	Select ▾
3_EXT_WALL428	External Wall	Select ▾	15	Select ▾	Select ▾
4_EXT_WALL451	External Wall	Select ▾	15	Select ▾	Select ▾
5_EXT_WALL474	External Wall	Select ▾	12	Select ▾	Select ▾
6_ADJ_WALL497	Internal Wall	Select ▾	12	Sala	Select ▾
7_EXT_WINDOW1520	Window	Select ▾	3.9378	Select ▾	Select ▾

Save and close



File Edit View Insert Tools Desktop Window Help

Selected Item

z [m]

6  
4  
2  
0

A 3D VISUALIZATION OF EACH SELECTED BUILDING COMPONENT  
ALLOWS AN IMMEDIATE FEEDBACK ON THE INPUT DATA!



DYNAMIC ENERGY SIMULATION  
OPEN LIBRARY FOR ENERGY USE  
AND COMFORT SIMULATIONS FOR  
THE BUILT ENVIRONMENT

ALMABuild is an open blockset of SIMULINK elements created by the Applied Thermal Engineering team of UNIBO for energy modelling of buildings dedicated to students, researchers, architects, engineers and building professionals.

Figura 24. Home page del sito web di ALMABuild.



## Almabuild & ALMABEST

ALMABuild as a component of the ALMABEST (Building Energy Simulation Toolbox) Matlab toolbox

ALMABEST (Building Energy Simulation Toolbox) is a Matlab toolbox, developed by UNIBO and operating in the Simulink environment, for the dynamic energy simulation of the whole building coupled to HVAC systems. ALMABEST is composed by two libraries: ALMABuild, used for the building modelling, and ALMAHVAC, adopted for the simulations of HVAC components. The two libraries are both composed by a series of Simulink blocksets and by a set of Graphical User Interfaces (GUIs). In particular each library consists of specific blockset devoted to specific aspects (i.e. weather data collection, thermal balance of the envelope elements and so on), which are composed by a series of subsystem. Finally, each subsystem contains a set of elementary blocks that are related to specific aspects of the building modelling.

The main feature of ALMABuild consists in the development of a series of m-files that, thanks to a series of GUIs, automatically implements the building model in the Simulink desktop. These m-files enable to recall automatically blocks from both Simulink and ALMABuild libraries. The blocks are properly linked each other by the m-files and specific parameters are set in an automatic way. In this way, the creation of the whole building modelling driven by these GUIs becomes fast and safe, with a reduced probability to make mistakes for non-expert users.

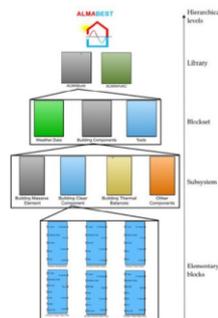


Figura 25. Sezione del sito relativa al funzionamento di ALMABuild.

## First steps & Weather data

The first steps for the energy modelling of a building: weather data



ALMABuild main interface

The creation of the complete energy model of a building with ALMABuild is an easy task!

The implementation of the building model in Simulink is obtained thanks to a series of Graphical User Interfaces (GUIs) which drive the user towards the construction of the building energy model; each GUI is linked to a specific aspect of the building modelling (i.e. definition of envelope elements, thermal zones, weather and so on).

To start the program it's necessary to give the command "ALMABuild" in the "Command Window" of MATLAB, after having added the program library by means of the "Set Path" in the "HOME" of MATLAB. At this point it's possible to load an old project or to start a new project, inserting all the building data.

The Simulink ALMABuild library is mainly composed by three blocksets: Climatic Data, Building Components and Tools.

The Weather Data blockset consists of blocks that are useful for the calculation of weather-related physical entities, like the incident solar radiation or to upload external weather data (i.e. Test Reference Year of a specified site) in the Simulink project.

The Building Component blockset is composed by elementary dynamic models of building envelope elements (walls, roofs, windows...).

Finally, blocks for the evaluation of comfort conditions in a thermal zone and other blocks used for the building modelling are collected in the Tools blockset.

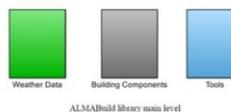
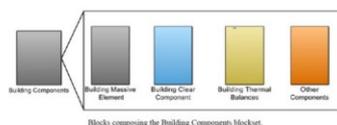


Figura 26. Sezione del sito relativa ai primi step su ALMABuild.

## Envelope components

The implementation of the thermophysical properties of the envelope components



Blocks composing the Building Component blockset.

The building informations are managed by means of the "Building Components blockset" which consists of four kinds of subsystems:

- Building Massive Element (BME) blocks, used for the modelling of opaque envelope elements (i.e. walls, roofs and floors)
- Building Clear Component (BBC) blocks, which contain the physical model of light clear building elements (i.e. windows);
- Building Thermal Balance (BTB) blocks and the Other Components block.

### Opaque envelope elements in ALMABuild

The properties of an opaque envelope element can be defined by means of the "Structure" GUI.

A label is linked to each massive envelope element by distinguishing among the following categories:

- External wall/Door;
- Internal wall, i.e. a wall between two adjacent thermal zones;
- Internal partition, that is a wall within a thermal zone;
- Ceiling (or internal floor);
- Roof.

Then, massive element stratigraphy (thickness, thermal conductivity, density, specific heat capacity), radiative coefficients for both solar and infrared radiation, and eventually the position of an active layer (i.e. in presence of radiant heating elements) can be defined, and from these data thermal transmittance, superficial mass and total thickness of the element are automatically calculated, clicking on "Calculate structure's properties".

Slab-on-grade floor, that is not listed among the categories defined in the Structure GUI, is described by means of a dedicated GUI (Add Floor) in which, in addition to the data required for the evaluation of the floor equivalent thermal transmittance, obtained by following the calculation procedure described in the EN ISO 13370, can be inserted.



Structure GUI used for the definition of main characteristics of massive elements.

Figura 27. Sezione del sito relativa all'implementazione degli elementi di involucro.

## Thermal zones definition

How to define thermal zones in a building



After having defined the weather data, the thermal properties of both opaque and clear envelope elements and the characteristics of eventual shadings devices, data about the thermal zones in which the building is divided can be inserted. Again, for this purpose a set of GUIs have been developed. Firstly, it is required to define the number of floors composing the building, and to label each floor, starting from the bottom floor. Then, for each floor, labels of thermal zones located in the considered stage can be defined.

Now, the user can insert the main properties of each thermal zone, by means of the GUI Thermal Zone Properties. A pop-up menu is used for the selection of the thermal zone, and internal air volume and initial air temperature can be defined. On the contrary, internal gains profile, characteristics of air ventilation and thermal bridges are inserted by means of dedicated GUIs.

Moreover the user can select the kind of model by means of which the thermal zone is simulated:

- simple model
- convective/radiative model

### The simple model

The simple model is the most used; it links to the zone two temperature values: the convective and radiative temperature of the zone.

If the simple model of the thermal zone is selected, it can be noted that the thermal zone is defined specifying for each envelope element, characterised by its typology and label, its orientation and area, that has to be calculated manually.

### The convective/radiative model

The convective model, as the radiative, is used for the determination of the spatial temperature distribution in a thermal zone.

These models take into account the convective airflows and the view factors for the estimation of the radiative heat fluxes among zone elements. The fully detailed model is adopted for the estimation of the spatial distribution of both the radiative and convective temperature.

Finally, by means of a pop-up menu, the user can select the typology of evaluation that has to be performed for the considered thermal zone: it is possible to evaluate the temperature of the thermal zone or the ideal power that a convective HVAC system has to provide to the zone to guarantee a defined air temperature profile. This last option is available only for simple or radiative detailed models. Based on the typology of model selected by the user for the building energy simulation, different geometry informations are needed.

Figura 28. Sezione del sito relativa alla scelta del modello della zona termica.

## Why ALMABuild?

### Why ALMABuild can be a valid alternative to the most diffuse commercial Codes?

ALMABuild is an open library of Simulink components. Each user can modify and add new blocks. In this way the user knows exactly what he is doing and how he can ask to the building model.

### Users must be expert in Simulink?

The knowledge of MATLAB is . The users who know MATLAB and Simulink can modify each block of the ALMABuild library and introduce new components for specific cases. However, if the user is not able to work directly with Simulink, the Simulink model is created automatically by ALMABuild!!

Generally, Whole Building Energy Simulation (WBES) tools do not allow a detailed prediction of comfort conditions, since the complete control of the local indoor conditions of a thermal zone needs a detailed reconstruction of the spatial distribution of humidity ratio, radiant temperature and air velocity among other parameters. To obtain this goal, a complete Computational Fluid Dynamics (CFD) simulation is generally needed, with an increase of the computational cost of the whole simulation which is obtained by coupling CFD and WBES by introducing the "co-simulation" concept.

### May I avoid Co-simulation?

Co-simulation means a model in which two or more software platforms are combined together with the aim to obtain detailed information about the observed system. Co-simulation is used also for solving multi-objective optimization problems; in fact, WBES tool in some cases is not directly able to use optimisation algorithms, so the multi-objective optimisation is obtained by using a specific external software in order to drive the WBES tool through the optimization: by means of the optimisation algorithm implemented in a dedicated software, input data of dynamic simulations performed with WBES tool can be iteratively modified, until optimal solutions are found.

The features of MATLAB/Simulink, as framework for developing new WBES tools, can overcome the limitations of many available WBES tools, reducing the use of complex co-simulations for the detailed evaluation of indoor comfort conditions and for solving multi-objective optimization problems. In particular, the possibility to use all the MATLAB toolboxes for solving problems concerning different issues (e.g. optimizations, CFD...) in a single computational environment, avoiding the need of coupling different software packages as well as the possibility to adopt a variable time step discretization for simulations are some of the most attractive features of MATLAB for the development of new WBES tools. This aspect can enlarge the number of users having the skills for the management of the sophisticated dynamic simulations since only the use of a unique tool operating in MATLAB is needed.

### Open-source is better?

ALMABuild forced the author to a deep and critical investigation of all the mechanisms which are involved in building physics. This investigation was not possible by using commercial codes because in these cases the user is able to understand only partially in which way the tool is able to model a specific aspect of the building physics. Finally, an important goal achieved by ALMABuild is the simplification of the creation of the building modelling in Simulink: the adoption of specific GUIs for the data insertion and the automatic creation of the building modelling, thanks to a series of m-files, enable to overcome the main drawback which is responsible of the limited diffusion of similar Simulink-based tools (see SIMBAD, HAMBASE, CARNOT and IBPT among others).

Figura 29. Sezione del sito relativa ai vantaggi di ALMABuild.

### 3 Analisi di diverse configurazioni impiantistiche basate su pompe di calore

#### 3.1 Pompa di calore dual source aria-terreno

##### 3.1.1 Background

I sistemi di riscaldamento basati su pompe di calore aria-acqua possono ridurre i consumi di energia primaria legati al riscaldamento e raffrescamento degli edifici rispetto ai tradizionali sistemi basati su caldaie a gas e condizionatori estivi [23-25]. Tuttavia, a causa delle significative variazioni della temperatura dell'aria esterna durante l'anno, questi sistemi sono caratterizzati da prestazioni energetiche variabili, che tendono a diminuire nei periodi più freddi (modalità riscaldamento) e più caldi (modalità raffrescamento). Inoltre, l'efficienza energetica delle pompe di calore ad aria si riduce durante la stagione invernale in presenza di valori di temperatura dell'aria esterna miti ma abbinati ad alti valori di umidità relativa, a causa del forte impatto delle perdite energetiche legate ai cicli di sbrinamento [26-27]. L'utilizzo di serbatoi esterni più stabili in termini di temperatura può quindi aumentare notevolmente l'efficienza della pompa di calore, come dimostrato da lavori recentemente pubblicati che confrontano le prestazioni energetiche delle pompe di calore ad aria con quelle delle pompe di calore che utilizzano ad esempio il terreno [28]. Le pompe di calore accoppiate al terreno a scambiatori verticali presentano ottimi valori dei fattori di prestazione energetica stagionale, sia per riscaldamento che per raffrescamento, grazie alla stabilità, a profondità maggiori di 10 m, della temperatura del terreno, che si mantiene pressoché costante e pari alla temperatura esterna media annua della località. Tuttavia, la diffusione di questi sistemi è stata fino ad ora limitata dagli elevati costi di investimento legati alle operazioni di installazione delle sonde geotermiche verticali (principalmente legati alla trivellazione del terreno).

Nella progettazione di un impianto di riscaldamento e raffrescamento basato su una pompa di calore accoppiata al terreno, risulta cruciale il corretto dimensionamento del campo sonde. In presenza infatti di sonde sottodimensionate e di carichi termici dell'edificio sbilanciati fra riscaldamento e raffrescamento, la temperatura del terreno tende a diminuire/aumentare di anno in anno. Tale comportamento penalizza la pompa di calore durante la sua vita operativa, diminuendone le prestazioni energetiche annuali. Per tener conto di questo aspetto occorre condurre un'analisi di lungo termine delle prestazioni della pompa di calore accoppiata al campo sonde, al fine di verificare se la "deriva termica" del terreno risulta minimale e quindi accettabile.

Al fine di superare i limiti sia delle pompe di calore ad aria (ovvero efficienza variabile) che di quelle accoppiate al terreno (ovvero elevati costi di impianto), è stata modellata su TRNSYS 17 un'innovativa pompa di calore a doppia sorgente (dual-source), in grado di utilizzare alternativamente due serbatoi esterni: aria e terreno. La pompa di calore presenta due diversi scambiatori di calore esterni, ovvero uno scambiatore a batteria alettata ed un campo di sonde verticali, utilizzabili alternativamente per scambiare calore rispettivamente con l'aria e con il terreno. Questo tipo di pompa di calore dual-source consente di ottenere prestazioni energetiche più elevate rispetto alle tradizionali pompe di calore ad aria, grazie allo sfruttamento del terreno durante i cicli di sbrinamento della macchina e durante le ore invernali più fredde e quelle estive più calde. L'impianto con pompa di calore dual-source è inoltre caratterizzato da costi di installazione inferiori rispetto ad una convenzionale pompa di calore accoppiata al terreno, grazie alla ridotta lunghezza totale del campo sonde rispetto alla lunghezza richiesta da una pompa di calore esclusivamente accoppiata al terreno. L'eventuale progressivo degrado delle prestazioni della macchina a seguito della deriva negli anni della temperatura del terreno può essere evitato grazie al fatto che durante le ore in cui viene utilizzata l'aria esterna come serbatoio di calore il terreno ha la possibilità di "rigenerarsi".

##### 3.1.2 Descrizione del caso studio e relativa modellazione

Per valutare le prestazioni energetiche della pompa di calore dual-source è stato selezionato un edificio residenziale unifamiliare sito a Bologna. L'edificio è una villetta unifamiliare ad un piano edificata una decina di anni fa con superficie netta pari a 111.6 m<sup>2</sup>, composta da quattro vani e caratterizzata da un buon livello di isolamento dell'involucro. Gli apporti interni sono definiti in accordo al report IEA SHC Task 44/HPP

Annex 38 (T44A38) [29]. I carichi termici dell'edificio sono stati calcolati su TRNSYS 17 e per le simulazioni dinamiche sono stati utilizzati i dati climatici del Test Reference Year di METEONORM [30] per Bologna. L'edificio presenta carichi termici fortemente sbilanciati: il carico di picco per riscaldamento è pari a 8.6 kW (a -7°C), mentre il massimo carico frigorifero è solo di 2.8 kW (a 35°C).

La pompa di calore, che costituisce l'unico generatore dell'impianto, permette di mantenere la temperatura di set-point interna pari a 20°C durante la stagione di riscaldamento e 26°C durante la stagione di raffrescamento. L'impianto HVAC è basato su una pompa di calore accoppiata a quattro ventilconvettori a due tubi e a 3 velocità, tramite un circuito idronico a due tubi. È presente un serbatoio d'acqua da 120 litri, che aumenta l'inerzia termica del circuito di distribuzione. Un'innovativa pompa di calore ad inverter a doppia sorgente (dual-source) è stata considerata come generatore di calore. Tale pompa di calore, il cui schema è mostrato in Figura 1, è dimensionata in modo da coprire il massimo carico termico dell'edificio, senza impiego di dispositivi di back-up, ed è in grado di funzionare utilizzando come serbatoio esterno, in alternativa, aria o terreno. Sono infatti presenti sia uno scambiatore a tubi alettati per la modalità ad aria, sia uno scambiatore a piastre per la modalità a terreno.

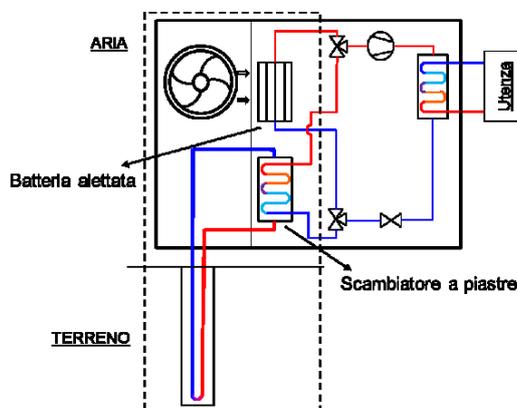
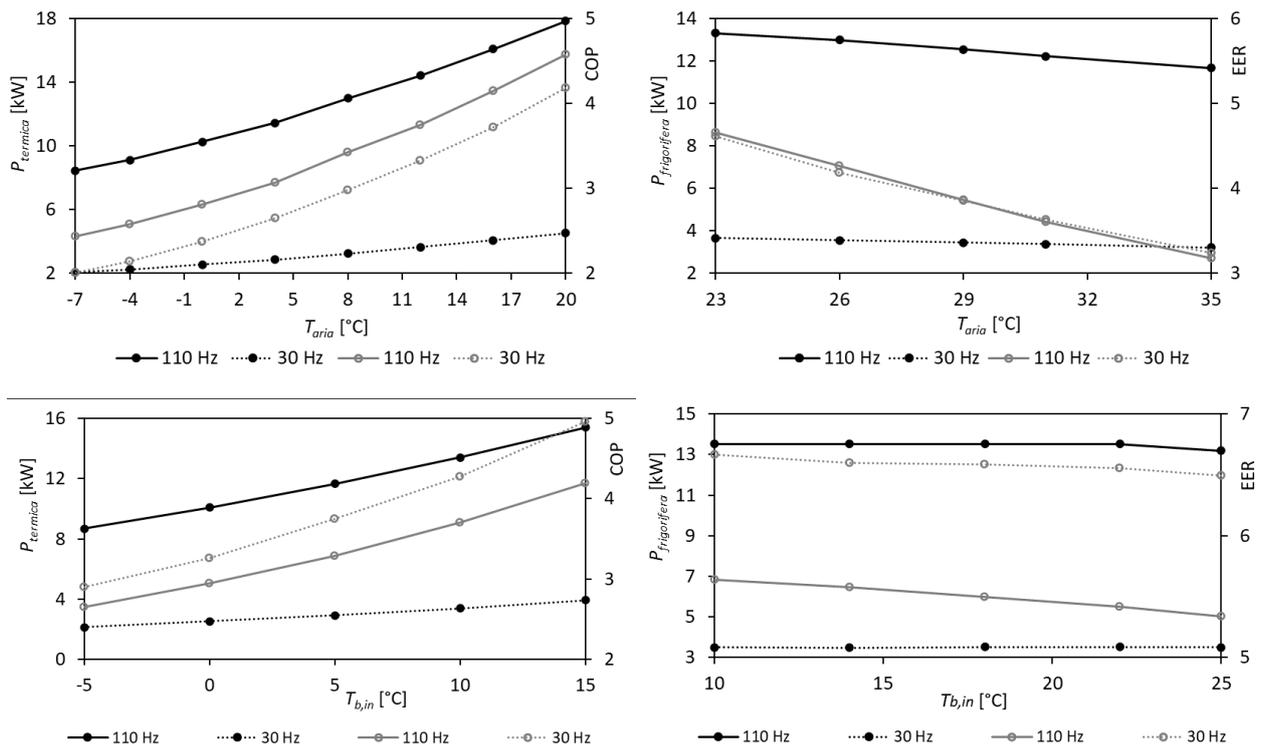


Figura 1. Schema della pompa di calore dual-source aria-terreno.

La pompa di calore è accoppiata ad un campo di sonde verticali a doppio tubo a U, in cui viene fatta circolare una miscela di acqua e glicole al 25%. Il diametro dei fori delle sonde è 152 mm, i tubi a U in polietilene hanno diametro esterno 32 mm e diametro interno 26 mm. Lo spazio tra tubi e terreno è riempito di malta sigillante. Per dimensionare il campo sonde è necessario tenere conto delle caratteristiche termiche del terreno. In questo caso è stato considerato il suolo tipico bolognese (55% ghiaia e sabbia, 45% argilla, parzialmente saturate d'acqua), modellato come un mezzo avente conducibilità termica 1.8 W/mK e diffusività termica  $8.81 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ . Considerando uno scambio termico col terreno di 40 W/m (dato ricavato da normativa, [31]), è stato calcolato che un campo composto da 2 sonde verticali di profondità 105 m ciascuna ( $2 \times 105$ ) è in grado di soddisfare il carico di picco dell'edificio. In aggiunta, sono state considerate diverse configurazioni sottodimensionate del campo sonde, ovvero: 2 sonde da 90 m l'una ( $2 \times 90$ ), 2 sonde da 75 m l'una ( $2 \times 75$ ), 1 sonda da 105 m ( $1 \times 105$ ) e 1 sonda da 90 m ( $1 \times 90$ ). Per evitare interferenze termiche, le sonde sono poste ad una distanza di 6 m l'una dall'altra.

Le curve caratteristiche della pompa di calore sono mostrate in Figura 2, in cui sono riportati la potenza termica (frigorifera) ed il COP (EER), in corrispondenza della massima e minima frequenza dell'inverter, in funzione della temperatura esterna, relativamente alla modalità ad aria, ed in funzione della temperatura dell'acqua glicolata in ingresso alla pompa di calore, relativamente alla modalità a terreno. Le curve riportate in Figura 2 sono state valutate considerando la temperatura dell'acqua erogata dalla pompa di calore pari a 45°C in riscaldamento e 7°C in raffrescamento.



**Figura 2. Curve caratteristiche della pompa di calore in modalità aria (in alto) e terreno (in basso): potenza termica/frigorifera (curve nere) e COP/EER (curve grigie).**

La penalizzazione dovuta ai cicli on-off della pompa di calore è stata inoltre valutata durante le simulazioni [32]. Inoltre, è stata modellata all'interno del software anche la penalizzazione dovuta ai cicli di sbrinamento effettuati quando la macchina lavora in modalità ad aria [27]. L'inverter della pompa di calore è in grado di modulare la potenza termica erogata modificando la velocità di rotazione del compressore. La strategia di controllo della pompa di calore si basa su un controllo PI che utilizza la temperatura di mandata dell'acqua come variabile monitorata (set-point 45°C in riscaldamento e 7°C in raffreddamento). È inoltre necessario uno specifico algoritmo di controllo per selezionare il serbatoio esterno (aria o terreno) con cui scambiare calore, scegliendo il corrispondente scambiatore. È possibile seguire logiche diverse per tale scelta; in questo lavoro il controllo è basato sul valore istantaneo assunto dalla temperatura dell'aria esterna. Durante la stagione invernale, quando la temperatura dell'aria scende sotto al valore di switch impostato, la pompa di calore cambia modalità di funzionamento passando da aria a terreno. Al contrario, quando la temperatura dell'aria esterna diventa maggiore della temperatura di switch, la macchina passa dalla modalità terreno a quella ad aria. Durante la stagione estiva, invece, la pompa di calore scarica il calore solo nel terreno al fine di ripristinarne la temperatura, poiché i carichi dell'edificio sono fortemente sbilanciati.

### 3.1.3 Discussione dei risultati

Le prestazioni annuali del sistema HVAC dotato di pompa di calore dual-source aria-terreno sono state valutate tramite il software di simulazione dinamica TRNSYS 17. È stato selezionato il parametro prestazionale APF (Annual Performance Factor), ovvero il rapporto tra l'energia, sia termica che frigorifera, complessivamente erogata dalla pompa di calore durante l'intero anno ed il corrispondente consumo totale di energia elettrica della macchina. Al fine di valutare la capacità della pompa di calore dual-source di ridurre la deriva della temperatura del terreno in presenza di edifici con carichi termici sbilanciati, sono state effettuate simulazioni del sistema di lungo termine (15 anni).

Le simulazioni hanno permesso di determinare il valore ottimale della temperatura di switch che massimizza il rendimento energetico annuale del sistema. In Figura 3 sono mostrati gli andamenti dell'APF (a sinistra) e della temperatura minima annuale del terreno (a destra) in funzione della temperatura di

switch, per ciascuna configurazione del campo sonde, in corrispondenza del settimo anno di funzionamento dell'impianto. Come si può notare dalla figura, la temperatura di switch ottimale dipende dalle dimensioni del campo sonde: è necessaria una temperatura inferiore in presenza di una minore lunghezza totale del campo, al fine di massimizzare il fattore di prestazione energetica annuale e preservare l'efficienza della pompa di calore in modalità terreno durante tutta la vita operativa dell'impianto.

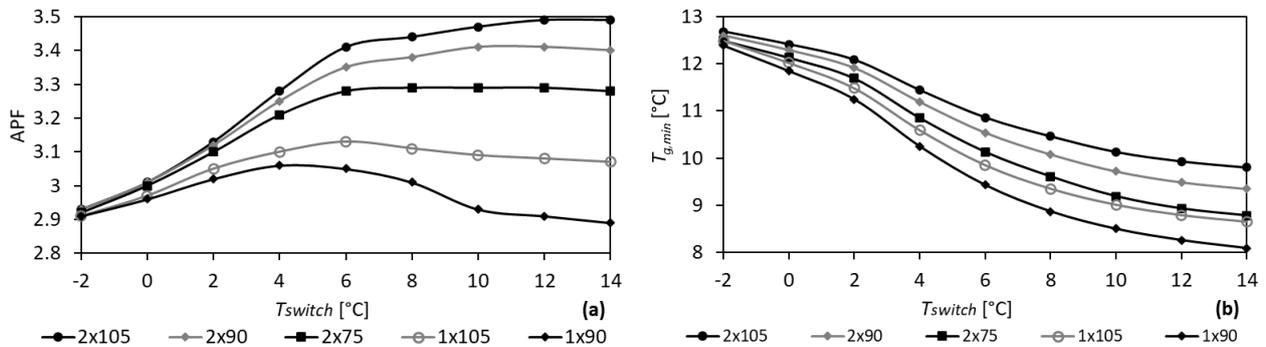


Figura 3. APF e minima temperatura annuale del terreno in funzione della temperatura di switch.

Sono state inoltre effettuate simulazioni in cui la medesima macchina scambia calore esclusivamente con l'aria e simulazioni in cui lo scambio avviene esclusivamente con il terreno. I risultati comparativi hanno mostrato che la pompa di calore dual-source è in grado di garantire prestazioni energetiche annuali migliori rispetto alla pompa di calore aerotermica (da +9% a +25%), ma inferiori a quelle della pompa di calore geotermica (da -2% a -14%). Tuttavia, l'utilizzo di due fonti di calore esterne consente alla pompa di calore dual-source di garantire APF più stabili durante i 15 anni di funzionamento rispetto alla pompa di calore geotermica. Inoltre, la pompa di calore dual-source permette una significativa riduzione dei costi di investimento complessivi, dovuta all'adozione di campi sonde più corti. È possibile ridurre la lunghezza totale del campo sonde fino al 50% in presenza di carichi sbilanciati dell'edificio, garantendo valori di APF maggiori del 10-20% rispetto ad una convenzionale pompa di calore ad aria.

Nella Figura 4 sono riportati i valori di APF per le varie configurazioni impiantistiche, assieme ai costi di investimento, relativi sia alla pompa di calore che al campo sonde (calcolato sulla base di un costo specifico di 50 € per metro di lunghezza lineare delle sonde). La pompa di calore più economica è la pompa di calore ad aria, mentre la più costosa è la dual-source, a causa della presenza di due scambiatori di calore esterni. Con l'adozione di una pompa di calore dual-source, però, il costo dovuto all'installazione del campo sonde diminuisce ed il costo totale d'impianto si riduce dal 6% al 32% rispetto a quello di una pompa di calore geotermica.

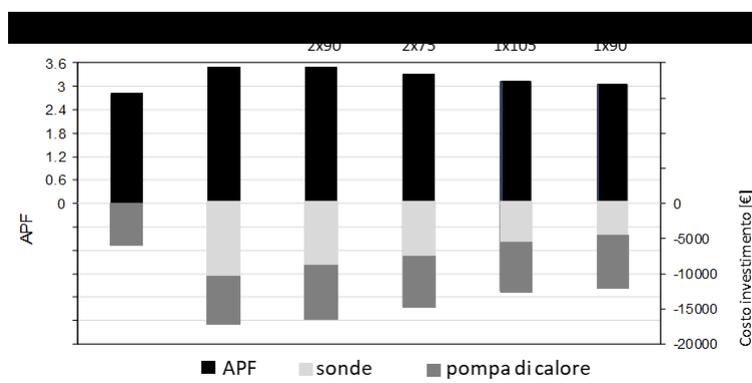


Figura 4. APF e costi di investimento per ciascuna configurazione impiantistica simulata.

Infine, per valutare la convenienza dell'adozione di una pompa di calore dual-source, è stato calcolato il pay-back time normalizzato,  $PBT'$ , ottenuto come rapporto tra il pay-back time originato dalla sostituzione

di una pompa di calore aerotermica con una dual-source e quello originato dalla sostituzione della stessa unità aerotermica con una pompa di calore geotermica. Con una riduzione del campo sonde del 30%, il valore di  $PBT'$  è intorno a 1 e con una riduzione del 50% è pari a 1.05. Questo risultato conferma come una riduzione del campo sonde del 30-50% equivalga a sostituire una pompa di calore aerotermica con una pompa di calore geotermica, con il vantaggio di ridurre la deriva della temperatura del terreno, stabilizzare le prestazioni energetiche del sistema anche in presenza di edifici con carichi fortemente sbilanciati e ridurre il costo di installazione dell'impianto. Tuttavia, sebbene l'installazione di una pompa di calore dual-source possa essere una soluzione competitiva rispetto ad una pompa di calore geotermica, il lieve aumento di APF rispetto a quello di una pompa di calore ad aria (vedi Figura 4) rende la soluzione dual-source non totalmente attraente per i progettisti.

I risultati mostrati rilevano quindi che la pompa di calore dual-source risulta adatta per edifici in cui vi sono problemi di sostenibilità di lungo termine a causa di carichi sbilanciati e/o di un errato dimensionamento del campo sonde, dovuto ad esempio ad una variazione della richiesta energetica dell'edificio in un momento successivo rispetto alla prima installazione dell'impianto.

### 3.2 Modellazione dinamica di pompe di calore accoppiate a campi fotovoltaici

#### 3.2.1 Background

Nel corso degli ultimi anni, l'utilizzo delle pompe di calore è diventato sempre più frequente all'interno degli impianti HVAC al servizio di edifici per una serie di indiscutibili benefici. In primo luogo, una pompa di calore reversibile è in grado di soddisfare tutti i carichi richiesti da un edificio (riscaldamento, raffrescamento e produzione di ACS) per mezzo di un unico dispositivo. Inoltre, la loro efficienza, così come la loro affidabilità, è di molto cresciuta nell'ultimo periodo. Infine, l'appetibilità delle pompe di calore elettriche è sicuramente migliorata a seguito di una sempre maggiore diffusione di dispositivi che permettono la produzione di energia elettrica in situ, come i pannelli fotovoltaici [33].

Alla luce di ciò, diventa sempre di maggiore importanza l'analisi di fattibilità tecnica ed economica di impianti in pompa di calore accoppiati a campi fotovoltaici. La non programmabilità e l'imprevedibilità della fonte solare, inoltre, rendono necessari l'inserimento all'interno dell'impianto di sistemi di accumulo dell'energia. Tali sistemi di accumulo possono essere di tipo elettrico (accumulatori o batterie) o di tipo termico (serbatoi di accumulo inerziale).

#### 3.2.2 Descrizione del caso studio

In questa sezione verranno riportati i risultati di uno studio, condotto in regime dinamico mediante il software TRNSYS, effettuato su un edificio residenziale situato a Bologna e dotato di un impianto di condizionamento basato sulla pompa di calore di tipo dual source descritta in [34]. Il lavoro svolto ha permesso di valutare le prestazioni energetiche annuali dell'impianto e di effettuare uno studio di fattibilità economica di diverse soluzioni alternative accoppiate alla pompa di calore: presenza di un sistema di generazione fotovoltaico, determinazione dell'estensione ottimale del campo fotovoltaico, presenza di una batteria per l'accumulo di energia elettrica, determinazione della taglia ottimale dell'accumulatore, presenza di un serbatoio di accumulo termico inerziale ad acqua.

In Figura 5 sono riportate una vista tridimensionale e la pianta dell'edificio simulato. L'immobile studiato è un'abitazione unifamiliare, appoggiata direttamente su terreno, sita a Bologna ed è costituita da 4 ambienti riscaldati. Al di sopra di essi è presente un sottotetto non riscaldato, mentre il tetto esterno è costituito da 2 falde inclinate a 30° e rivolte in direzione Nord-Sud. L'involucro edilizio è caratterizzato da un discreto livello di isolamento termico, a norma di legge, mentre gli infissi sono costituiti da doppi vetri 4-12-4 con intercapedine riempita da Argon.

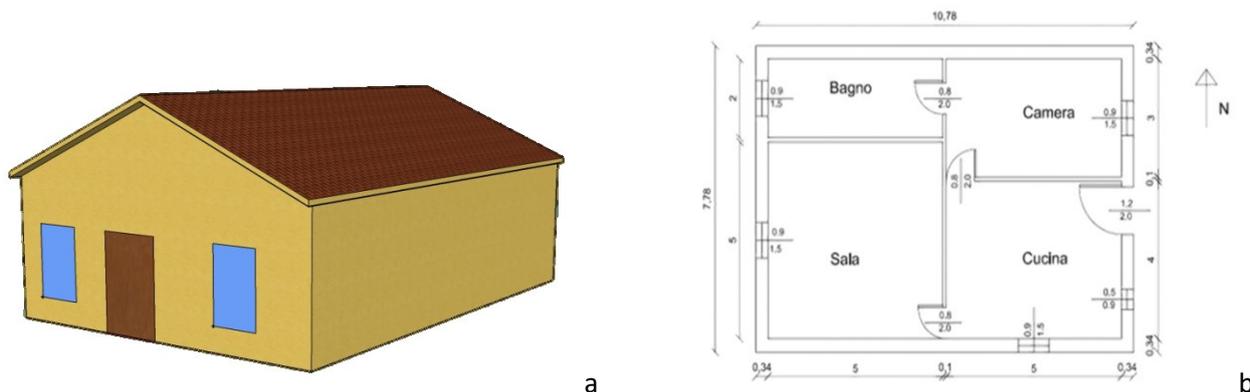


Figura 5. Vista tridimensionale (a) e pianta dell’edificio simulato (b).

Per mezzo del software TRNSYS sono stati calcolati i carichi termici di progetto dell’edificio per la stagione invernale e per quella estiva. Le simulazioni numeriche hanno evidenziato come il carico di picco registrato per il riscaldamento degli ambienti sia pari a circa 4.5 kW, tre volte maggiore rispetto al carico di picco relativo alla stagione estiva, pari a circa 1.5 kW. Sulla base di questi carichi di progetto, è stata dimensionata la pompa di calore dual-source al servizio dell’impianto di condizionamento. Ricordiamo che questo tipo di pompa di calore è in grado di sfruttare due diverse sorgenti termiche, in alternativa: aria o terreno, per mezzo di sonde geotermiche. Per ottenere le prestazioni energetiche ottimali, la sorgente termica viene selezionata in base al livello termico che garantisce un’efficienza termodinamica più alta.

Lo scopo di questa analisi è quello di ottimizzare l’accoppiamento di una pompa di calore ed un campo di pannelli fotovoltaici. L’analisi svolta è stata di tipo tecnico-economico ed ha tenuto conto dei costi di investimento necessari per l’installazione del campo fotovoltaico e di eventuali accumulatori, e del costo annuale della bolletta elettrica. Per calcolare tale bolletta elettrica, si è fatto riferimento alle condizioni economiche per i clienti del servizio di maggior tutela, riservato ad abitazioni di residenza anagrafica. In particolare, è stata considerata la tariffa bioraria e le relative condizioni applicate per il I° trimestre 2021 e consultabili sul sito di Arera (Autorità di Regolazione Energia Reti e Ambiente) [35]. In Tabella 1 sono riportati i costi e le tariffe considerate in questo lavoro.

Tabella 1. Condizioni economiche per i clienti del servizio di maggiore tutela (I° trimestre 2021).

	Materia energia		Trasporto e gestione del contatore	Oneri di sistema
	Fascia F1	Fascia F23		
<b>Quota energia [€/kWh]</b>	0.08311	0.06827	0.00889	0.041776
<b>Quota fissa [€/anno]</b>	51.6984		20.52	/
<b>Quota potenza [€/kW anno]</b>	/		21.24	/

### 3.2.3 Discussione dei risultati

La prima simulazione svolta ha voluto valutare le prestazioni energetiche annuali dell’impianto e la relativa bolletta economica nel caso in cui non venga installato alcun pannello fotovoltaico. Per questa simulazione e per quelle che verranno presentate in seguito, sono state fissate una serie di condizioni: la pompa di calore è spenta durante la notte e per il calcolo della bolletta economica sono stati considerati solamente i consumi elettrici della pompa di calore e degli ausiliari dell’impianto, come la pompa di circolazione. I risultati ottenuti evidenziano che nella configurazione base la pompa di calore eroga complessivamente circa 17800 kWh di energia termica durante la stagione invernale e circa 12300 kWh di energia frigorifera durante la stagione estiva. Il fabbisogno elettrico dell’unità è pari a circa 3200 kWh durante il periodo invernale e a circa 1000 kWh durante la stagione di raffrescamento. Di conseguenza, le prestazioni

energetiche stagionali della macchina (*SCOP* e *SEER* per le stagioni di riscaldamento e raffrescamento) sono rispettivamente pari a 3.3 e 5.4. Il fabbisogno elettrico complessivo dell'impianto durante tutto l'anno è pari a circa 5000 kWh, a cui corrisponde una bolletta elettrica pari a 833 €.

A partire da questa configurazione base, sono state eseguite una serie di simulazioni per valutare l'influenza dell'installazione di un campo fotovoltaico sulle prestazioni energetiche e sui costi di esercizio annuali. In un primo gruppo di simulazioni è stato studiato come varia l'efficienza complessiva del sistema introducendo un campo fotovoltaico da 3 kWp, in assenza di un accumulatore o con una batteria di accumulo di capacità pari a 1 kWh, 3 kWh e 6 kWh. In seguito, è stata aumentata la taglia del sistema fotovoltaico, portandola a 4.5 kWp e 6 kWp in assenza di batteria di accumulo o con accumulatore da 3 kWh. Infine, è stato valutato se è più conveniente utilizzare un accumulatore di tipo elettrico o un accumulatore di tipo termico. I pannelli fotovoltaici simulati sono del tipo in silicio monocristallino, mentre la batteria considerata è agli ioni di litio, con catodo in litio-ferro-fosfato, una tipologia di accumulatore che garantisce una lunga vita operativa, maggiore ai 2000 cicli di carica e scarica, ed una elevata sicurezza intrinseca.

La fattibilità economica delle diverse configurazioni è stata valutata tenendo conto di tutti i fattori in gioco. In particolare, per ogni caso studiato sono stati calcolati i costi d'investimento necessari per l'installazione dei pannelli fotovoltaici, dell'inverter e dell'accumulatore, le relative detrazioni fiscali al 50%, i costi di manutenzione annuali, la possibilità di accedere allo scambio sul posto, i tassi di inflazione ed il tasso di aumento per il costo dell'energia. Tutti questi fattori permettono di calcolare il Pay Back Time (PBT) ed il Valore Attuale Netto (VAN) legato alle diverse configurazioni studiate e, quindi, di selezionare la soluzione ottimale. L'orizzonte temporale dell'analisi economica è stato posto pari a 25 anni, ossia la durata dei pannelli fotovoltaici garantita dal produttore.

**Tabella 2. Risultati delle simulazioni eseguite.**

Caso	Consumi elettrici annui [kWh]	Bolletta elettrica [€]	PBT	SCOP	SEER	Riduzione consumi
<b>Caso base</b>	5032	833	-	3.3	5.4	-
<b>3 kWp</b>	3259	564	8	4.5	13.6	-35.2%
<b>3 kWp + batteria 1 kWh</b>	3062	541	8	4.6	18.4	-39.2%
<b>3 kWp + batteria 3 kWh</b>	2822	496	9	4.7	33.3	-43.9%
<b>3 kWp + batteria 6 kWh</b>	2651	472	11	4.8	84.6	-47.3%
<b>3 kWp + accumulatore termico</b>	3267	565	8	4.5	14.3	-35.1%
<b>4.5 kWp</b>	3013	525	9	4.9	14.8	-40.1%
<b>4.5 kWp + batteria 3 kWh</b>	2502	449	11	5.3	43.3	-50.3%
<b>4.5 kWp + accumulatore termico</b>	3024	526	10	4.9	15.5	-39.9%
<b>6 kWp</b>	2882	505	14	5.1	15.4	-42.7%
<b>6 kWp + batteria 3 kWh</b>	2332	422	14	5.6	48.9	-53.7%
<b>6 kWp + accumulatore termico</b>	2894	506	13	5.1	16.1	-42.5%

In Tabella 2 sono riportati i risultati ottenuti per tutte le simulazioni numeriche effettuate. Analizzando i dati, si osserva che le configurazioni più fattibili da un punto di vista economico, caratterizzate da un PBT pari a circa 8 anni, sono tutte relative all'installazione di un impianto fotovoltaico da 3 kWp. In particolare, sono soluzioni equivalenti dal punto di vista economico l'assenza dell'accumulatore elettrico, l'installazione

di una batteria con capacità pari a 1 kWh o l'installazione di un accumulo termico. Per queste tre configurazioni si osserva un calo dei consumi elettrici complessivi dell'impianto rispetto alla configurazione iniziale che oscilla fra il 35% ed il 39%. Analizzando in maniera più approfondita i risultati dello studio di fattibilità economica di questi 3 interventi, è stato osservato come tutte queste configurazioni riescano a garantire un risparmio complessivo al 25esimo anno dopo l'installazione pari a circa 10000 €, garantendo così significativi benefici per gli utenti.

Una maggiore riduzione percentuale del fabbisogno elettrico complessivo si registra per la configurazione caratterizzata da un campo fotovoltaico da 6 kWp accoppiato con un accumulatore da 3 kWh. In questo caso, i consumi elettrici complessivi diminuiscono quasi del 54% rispetto alla soluzione di partenza ed è possibile ridurre di conseguenza la bolletta elettrica annuale di più di 400 €. Tuttavia, in questo caso il tempo di ritorno economico dell'intervento è piuttosto lungo ed è maggiore di 14 anni a causa degli alti costi di investimento iniziali.

In tutti i casi analizzati è possibile osservare un forte aumento delle prestazioni energetiche stagionali della pompa di calore, incremento che può portare durante la sola stagione estiva ad aumentare il *SEER* della macchina anche di un fattore 15 rispetto alla situazione di partenza. Le simulazioni effettuate confermano infatti la potenzialità di accoppiare un impianto basato su una pompa di calore con un campo fotovoltaico ed un sistema di accumulo (elettrico o termico). Durante la stagione estiva si ottengono miglioramenti più significativi in quanto la produzione di energia elettrica e la richiesta di energia frigorifera sono fondamentalmente contemporanee ed è possibile così quasi azzerare i consumi effettivi della pompa di calore.

### *3.3 Utilizzo dell'inerzia termica dell'involucro edilizio per diminuire i consumi energetici di un impianto in pompa di calore con integrazione elettrica*

#### *3.3.1 Background*

Per promuovere la decarbonizzazione del parco edilizio europeo, sono state recentemente pubblicate una serie di Direttive della Commissione Europea sull'efficienza energetica nell'edilizia [36-38]; tra i diversi temi rilevanti trattati, le direttive sottolineano l'importanza di progettare abitazioni intelligenti, con la capacità di adattare il fabbisogno energetico dell'edificio alle effettive esigenze degli utenti. Una semplice e promettente strategia per ridurre i consumi energetici è l'uso della capacità termica dei componenti dell'involucro edilizio per accumulare energia termica al loro interno e sfasare la richiesta di energia termica dell'edificio e, di conseguenza, la potenza elettrica assorbita da pompe di calore e condizionatori. Più nel dettaglio, tutti gli edifici sono in grado di immagazzinare energia termica all'interno del loro involucro, grazie alla presenza di elementi massivi come muri esterni, tetti e soffitti: questo quantitativo di energia immagazzinata può essere utilizzato per ottimizzare passivamente le prestazioni di un impianto HVAC [39]. Infatti, sfruttando la capacità termica dell'involucro edilizio è possibile ritardare l'attivazione dell'impianto, senza peggiorare le condizioni di comfort termo-igrometrico interno. Gli ambienti di un edificio possono infatti essere riscaldati (o raffreddati) in maniera aggiuntiva in corrispondenza di condizioni di funzionamento favorevoli per il generatore di calore. In seguito, è possibile sfruttare l'energia termica immagazzinata per ritardare la riattivazione dell'impianto. La modalità più semplice per sfruttare l'inerzia termica dell'involucro edilizio è quella di variare il set-point interno per l'attivazione dell'impianto, aumentandolo durante la stagione invernale o diminuendolo durante la stagione estiva, in corrispondenza di condizioni esterne favorevoli. È importante assicurare che la temperatura operativa interna venga mantenuta all'interno di un intervallo che garantisca condizioni di comfort adeguato.

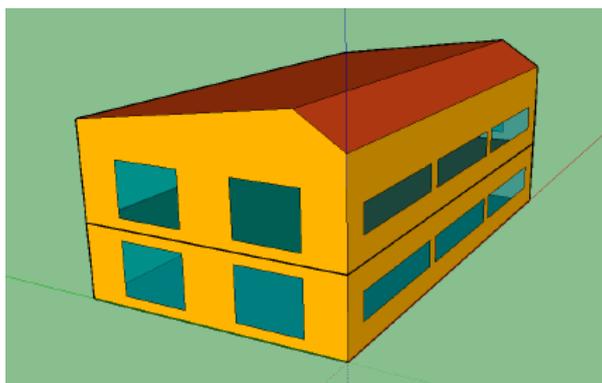
Le pompe di calore sono generatori di calore che possono essere facilmente accoppiati a logiche di controllo intelligenti basate sull'accumulo di calore all'interno dell'involucro edilizio. Il funzionamento di questi dispositivi può infatti essere determinato in maniera flessibile in base a diversi parametri operativi, come il costo dell'energia elettrica, le condizioni ambientali esterne e le condizioni interne all'edificio. In letteratura si trovano diversi lavori che hanno introdotto logiche di controllo in grado di ridurre la potenza elettrica di picco richiesta da una pompa di calore, disaccoppiando i carichi termici con quelli elettrici [40]. Nell'analisi riportata in questa sezione, si sono voluti invece indagare gli effetti sulle prestazioni energetiche

di un impianto basato su una pompa di calore aria-acqua, integrata con una resistenza elettrica, e sulle condizioni di comfort termico interno, a seguito dell'applicazione di una strategia di controllo che permette di immagazzinare energia termica direttamente all'interno delle componenti massive dell'involucro edilizio.

### 3.3.2 Descrizione del caso studio

L'analisi è stata svolta in regime di riscaldamento considerando un edificio residenziale di riferimento localizzato a Milano ed è stata condotta per mezzo di simulazioni dinamiche, effettuate con il software TRNSYS. Secondo l'algoritmo proposto, quando la temperatura dell'aria esterna è maggiore della temperatura bivalente dell'impianto (ovvero la temperatura dell'aria esterna in corrispondenza della quale la potenza termica erogata dalla pompa di calore è uguale al carico termico dell'edificio), il valore di set-point per la temperatura interna viene aumentato, con l'obiettivo di immagazzinare energia termica all'interno degli elementi massivi dell'involucro nei momenti in cui la potenzialità della pompa di calore supera il carico richiesto dall'edificio. Quando la temperatura esterna è inferiore alla temperatura bivalente, il calore immagazzinato viene utilizzato come sistema di backup passivo della pompa di calore, evitando l'attivazione della resistenza elettrica integrativa.

Nelle simulazioni presentate sono state prese in considerazione diverse configurazioni dell'impianto di riscaldamento, variando la taglia della pompa di calore e simulando due diverse tipologie di terminali di emissione: fan-coil e superfici radianti a pavimento. Si è voluto infatti valutare l'influenza delle unità terminali sull'efficacia dell'algoritmo proposto, in quanto i fan-coil sono terminali di tipo convettivo, che riscaldano direttamente l'aria interna, mentre i pannelli radianti a pavimento attivano direttamente l'involucro edilizio ed hanno un ridotto effetto diretto sulla temperatura interna.

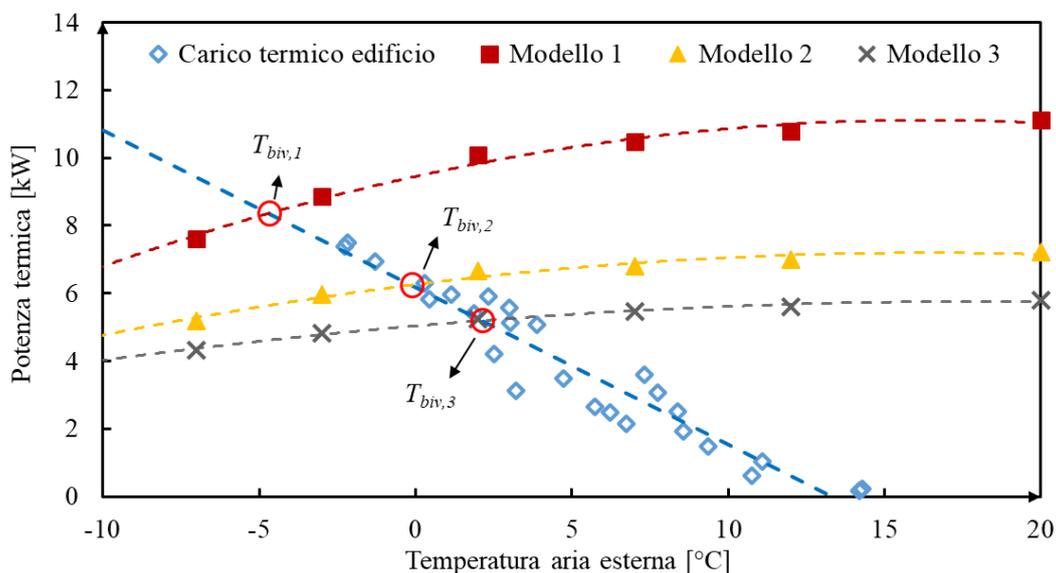


**Figura 6. Vista tridimensionale dell'edificio di riferimento SFH 45 simulato.**

L'edificio di riferimento considerato per le simulazioni è ricavato dall'IEA SHC Task 44 [29], dove sono definiti tre diversi edifici (SFH15, SFH45, SFH100), caratterizzati dalla stessa geometria e da un isolamento termico dell'involucro variabile. Per questa analisi è stato implementato all'interno dell'ambiente TRNSYS l'edificio SFH45: in Figura 6 è mostrata una vista tridimensionale dell'edificio. Come anticipato, l'edificio è stato localizzato a Milano e le simulazioni hanno coperto l'intera stagione di riscaldamento convenzionale (dal 15 ottobre al 15 aprile). Il carico termico di progetto, calcolato con una temperatura di set-point interna di 22°C è pari a 8.3 kW in corrispondenza della temperatura esterna di progetto (-5°C). A seconda della tipologia di terminali di emissione sono stati definiti diversi valori interni di set-point al fine di garantire le stesse condizioni di comfort interno e rendere confrontabili tra di loro i risultati ottenuti per le due configurazioni simulate. In particolare, nelle simulazioni che considerano i fan-coil come terminali, è stato impostato un valore di set-point pari a 22°C, mentre con i pannelli radianti tale valore è stato considerato pari a 20.5°C. Le temperature di set-point riportate vengono scelte all'interno del range indicato dalla norma europea EN 7730 per la classe di comfort B.

L'impianto di riscaldamento è basato su una pompa di calore aria-acqua ad inverter. Sono stati considerati tre diversi modelli di pompa di calore, prodotti dallo stesso costruttore e caratterizzati da diverse taglie. L'unità più grande (modello 1), ha una potenza termica nominale a pieno carico pari a 10.5 kW (per una

temperatura esterna di 7°C e con temperatura ingresso/uscita acqua pari a 40/45°C). Questo modello risulta leggermente sovradimensionato per il carico di progetto dell'edificio mentre le pompe di calore più piccole (modelli 2 e 3) risultano sottodimensionate, in quanto caratterizzate da una potenza termica nominale pari rispettivamente a 6.80 kW e 5.46 kW.



**Figura 7. Carico termico dell'edificio e dati prestazionali a pieno carico delle pompe di calore in funzione della temperatura esterna.**

In Figura 7 è riportato il carico termico richiesto dall'edificio in funzione della temperatura esterna (firma energetica). Inoltre, nella stessa Figura sono anche riportate le curve prestazionali a pieno carico delle tre pompe di calore considerate. Osservando la Figura 7, è evidente che il modello 1 soddisfa il carico termico richiesto dall'edificio durante tutta la stagione senza la necessità di un sistema di backup. Infatti, tale unità abbinata all'edificio di riferimento è caratterizzata da una temperatura bivalente prossima alla temperatura esterna di progetto di Milano. Le pompe di calore più piccole, invece, sono sottodimensionate rispetto al fabbisogno energetico effettivo: la temperatura bivalente è uguale a 0°C per il modello 2 ed a 2°C per il modello 3. In questi casi, quando la temperatura esterna è inferiore alla temperatura bivalente, la pompa di calore funziona a pieno carico e deve essere attivato un generatore di calore integrativo per coprire l'intero fabbisogno energetico dell'edificio. In questa analisi, è stata considerata una resistenza elettrica di potenza pari a 2 kW.

Il controllo per l'attivazione della resistenza elettrica di backup si basa su una logica temperatura-tempo. Quando la temperatura di mandata all'impianto è inferiore al valore di set-point per un periodo di tempo prefissato, la resistenza elettrica viene accesa. Il tempo di ritardo è necessario per evitare attivazioni non necessarie della resistenza elettrica ed il suo valore dipende dalla tipologia di terminali di emissione accoppiati alla pompa di calore: tale ritardo è più breve per le unità terminali caratterizzate da bassa inerzia termica, come i fan-coil, e più lungo per dispositivi ad alta inerzia, come i pannelli radianti. Di conseguenza, il tempo di ritardo è stato fissato pari a 45 e 90 minuti per le due tipologie di terminali simulati.

La strategia di controllo introdotta, in grado di sfruttare l'inerzia termica dell'involucro edilizio, verrà denominata Thermal Inertia Control Logic (TICL) nella parte seguente del capitolo. In particolare, la temperatura di set-point interna viene aumentata di 2°C quando la temperatura ambiente è maggiore della temperatura bivalente del sistema, temperatura che varia a seconda del modello di pompa di calore considerato. La TICL si attiverà nei periodi caratterizzati da temperature esterne superiori a -5°C quando viene considerato il modello 1, 0°C e 2°C quando vengono selezionati rispettivamente il modello 2 ed il modello 3.

L'efficacia della logica proposta è stata valutata per mezzo di una serie di indicatori prestazionali. In particolare, sono stati utilizzati il  $SCOP_{net}$  ed il  $SCOP$ , introdotti dalla norma Europea EN 14825, definiti rispettivamente come il rapporto fra l'energia termica erogata dalla sola pompa di calore ( $E_{th,PdC}$ ) ed il consumo elettrico della stessa ( $E_{el,PdC}$ ), ed il rapporto fra l'energia complessivamente erogata da pompa di calore e resistenza ( $E_{th,RE}$ ) e l'energia elettrica complessivamente assorbita da entrambi i componenti (il consumo elettrico della resistenza,  $E_{el,RE}$ , è pari a  $E_{th,RE}$ ). Inoltre, per tutte le simulazioni effettuate è stato valutato il comfort termico garantito all'interno dell'edificio. Per tale valutazione, è stata utilizzata la metodologia riportata dalla norma europea EN ISO 7730. In particolare, il Voto Medio Previsto ( $PMV$ ) è stato considerato come l'indicatore di riferimento. Il suo valore è stato valutato in funzione della temperatura interna, della temperatura media radiante e dell'umidità relativa interna, calcolati con TRNSYS, fissando la velocità dell'aria all'interno degli ambienti, il tasso metabolico degli occupanti ed il fattore di abbigliamento. Questi parametri sono stati definiti rispettivamente pari a 0.1 m/s, 1.2 met (attività sedentaria) ed 1 clo (tipico abbigliamento invernale).

### 3.3.3 Discussione dei risultati

In Tabella 3 vengono riportati i risultati delle prime simulazioni dinamiche, effettuate senza applicare la logica TICL proposta. In Tabella, le prestazioni energetiche stagionali dell'impianto ed il comfort termico percepito sono suddivisi a seconda della tipologia di terminale considerato: il caso A indica i risultati ottenuti per i fan-coil ed il caso B è relativo all'utilizzo di superfici radianti a pavimento. I valori di  $PMV$  evidenziati sono stati calcolati come media lungo tutto il periodo di riscaldamento, non tenendo conto delle ore notturne (dalle 23 alle 7), mentre il periodo di discomfort indicato in Tabella 3 è stato calcolato come il numero di ore in corrispondenza delle quali il  $PMV$  supera i limiti raccomandati dalla normativa per il comfort (cioè  $PMV$  inferiore a -0.5 o superiore a +0.5, range corrispondente alla classe di comfort termico B).

**Tabella 3. Prestazioni energetiche stagionali dell'impianto senza l'applicazione della logica TICL.**

	Caso A (Fan-coil)			Caso B (Pannelli radianti)		
	Modello 1	Modello 2	Modello 3	Modello 1	Modello 2	Modello 3
$E_{th,PdC}$ [kWh]	15373	12979	11937	16243	13397	11870
$E_{el,PdC}$ [kWh]	5407	4288	3718	5415	4233	3690
$E_{th,RE}$ [kWh]	58	2223	2929	149	2403	3025
$E_{el,RE}$ [kWh]	58	2223	2929	149	2403	3025
$E_{th,tot}$ [kWh]	15431	15202	14866	16392	15800	14895
$E_{el,tot}$ [kWh]	5465	6511	6647	5564	6636	6715
$SCOP_{net}$	2.84	3.03	3.21	3.00	3.16	3.22
$SCOP$	2.82	2.33	2.24	2.95	2.38	2.22
$PMV$	-0.26	-0.28	-0.34	-0.12	-0.19	-0.23
<b>Periodo discomfort (ore)</b>	503	542	624	225	378	497

I risultati ottenuti mostrano che con il controllo convenzionale dell'impianto di riscaldamento, la pompa di calore dimensionata sul carico di picco dell'edificio (ovvero, il modello 1) rappresenta la soluzione più efficiente per entrambe le tipologie di terminale. Infatti, riducendo la taglia del generatore di calore, le prestazioni della sola pompa di calore ( $SCOP_{net}$ ) aumentano fra il 5% ed il 15%, ma, tuttavia, aumenta parallelamente il consumo di energia legato al sistema di backup. Di conseguenza, la prestazione energetica dell'intero sistema ( $SCOP$ ) diminuisce notevolmente passando dal modello 1 al modello 3: il  $SCOP$  si riduce di circa il 21% per il caso A e di circa il 25% per il caso B. L'analisi sul comfort termico garantito all'interno dell'edificio evidenzia che la tipologia di terminale ha un'influenza significativa su di esso: considerando il Caso A, le condizioni medie di comfort interno sono comprese nella classe di comfort B, mentre per il Caso B si ottengono condizioni migliori selezionando i modelli 1 e 2, con un valore stagionale di  $PMV$  corrispondente alla classe di comfort A (voto medio previsto tra -0.2 e +0.2). Ciò è dovuto al fatto che i

pannelli radianti sono in grado di aumentare sensibilmente la temperatura media radiante della zona termica, garantendo valori più elevati della temperatura operativa e migliori condizioni di comfort. Questi risultati sono confermati osservando la durata del periodo di discomfort riportato in Tabella 3 per i vari casi: tale periodo è significativamente più alto per le unità terminali convettive rispetto ai terminali radianti.

**Tabella 4. Prestazioni energetiche stagionali dell'impianto con l'applicazione della logica TICL.**

	Caso C (Fan-coil + TICL)			Caso D (Pannelli radianti + TICL)		
	Modello 1	Modello 2	Modello 3	Modello 1	Modello 2	Modello 3
$E_{th,PdC}$ [kWh]	17866	15142	13865	21172	16389	13845
$E_{el,PdC}$ [kWh]	6152	4933	4289	6874	5042	4214
$E_{th,RE}$ [kWh]	137	2423	3361	284	1893	2489
$E_{el,RE}$ [kWh]	137	2423	3361	284	1893	2489
$E_{th,tot}$ [kWh]	18003	17565	17226	21456	18282	16334
$E_{el,tot}$ [kWh]	6289	7356	7650	7158	6935	6703
$SCOP_{net}$	2.90	3.07	3.23	3.08	3.25	3.29
$SCOP$	2.86	2.39	2.25	3.00	2.64	2.44
$PMV$	0.22	0.16	0.12	0.52	0.18	-0.14
<b>Periodo discomfort (ore)</b>	238	287	408	2349	306	283

Le simulazioni numeriche sono state ripetute applicando la logica di controllo TICL proposta. Come mostrato dai risultati riportati in Tabella 4, la strategia di controllo TICL influenza il comportamento dell'impianto di riscaldamento. L'energia termica complessivamente fornita all'edificio aumenta per tutte le simulazioni effettuate. Quando le unità terminali sono costituite dai fan-coil (Caso C), tale incremento è indipendente dal dimensionamento della pompa di calore ed è pari quasi al 16% rispetto alle corrispondenti soluzioni del caso A. In presenza di superfici radianti (Caso D), invece, l'energia termica complessivamente erogata aumenta del 31% per il modello 1 e del 10% per il modello 3. Come conseguenza dell'aumento della temperatura di set-point interna, anche i valori di  $PMV$  si innalzano quando viene introdotto l'algoritmo TICL: le condizioni medie di comfort interno sono in classe A per tutte le configurazioni simulate ad eccezione del Caso D con il modello 1. In questo caso, infatti, gli ambienti interni all'edificio risultano sovra-riscaldati per una quota significativa della stagione di riscaldamento, pari a circa 2300 ore.

L'adozione della logica di controllo TICL consente di migliorare le prestazioni energetiche stagionali degli impianti basati su pompe di calore sottodimensionate (modelli 2 e 3). Per questi casi, infatti, si osserva un aumento del  $SCOP$  pari al 10% circa per il Caso D rispetto al Caso B. Confrontando le Tabelle 3 e 4, è evidente che il consumo di energia elettrica legato alla resistenza elettrica di back-up diminuisce e, contemporaneamente, il fabbisogno di energia elettrica della pompa di calore aumenta. La pompa di calore è in grado infatti di funzionare per un periodo più lungo durante la parte più mite della giornata e l'energia termica in eccesso fornita all'edificio viene immagazzinata all'interno dell'involucro edilizio. In seguito, durante la parte più fredda della giornata, i componenti dell'involucro rilasciano l'energia accumulata e di conseguenza l'attivazione della resistenza elettrica viene evitata o ritardata.

Infine, i risultati delle simulazioni evidenziano che non è possibile ottenere benefici significativi adottando la logica TICL quando sono installati terminali di emissione di tipo convettivo come i fan-coil. Confrontando i risultati ottenuti per il Caso A con quelli del Caso C, è evidente che il consumo stagionale di energia elettrica aumenta di circa il 15% sia per la pompa di calore che per la resistenza elettrica. I dati presentati indicano che l'inerzia termica dell'involucro edilizio può essere sfruttata in modo efficiente solo adottando unità terminali di tipo radiante.

In conclusione, è possibile installare una pompa di calore sottodimensionata accoppiata ad emettitori radianti, sfruttando la capacità degli elementi massivi dell'involucro di accumulare energia termica quando la temperatura esterna è maggiore della temperatura bivalente dell'impianto. L'energia termica

immagazzinata può poi essere utilizzata quando la temperatura esterna diventa inferiore alla temperatura bivalente, migliorando parzialmente le condizioni di comfort termico interno e riducendo il fabbisogno energetico complessivo dell'impianto durante la stagione di riscaldamento.

### 3.4 Sistema ibrido con pompa di calore e caldaia

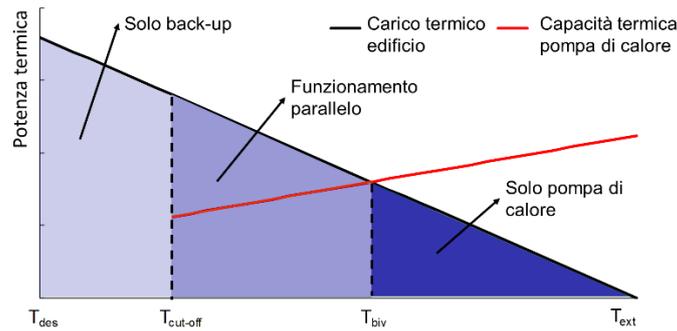
#### 3.4.1 Background

L'efficienza energetica delle pompe di calore per il riscaldamento di edifici è influenzata dalla temperatura del serbatoio termico esterno, che, se costituito da aria esterna, può essere instabile durante la stagione di riscaldamento. Poiché la capacità termica ed il COP della pompa di calore calano al diminuire della temperatura dell'aria esterna, al fine di coprire il carico massimo dell'edificio la macchina deve essere sovradimensionata. Di conseguenza, durante le ore più miti, la potenza termica richiesta dall'edificio risulta inferiore alla massima generabile dalla macchina, che si trova quindi a dover modulare la propria potenza, arrivando spesso a dover effettuare cicli on-off, che peggiorano il rendimento complessivo della macchina.

Una soluzione idonea ad evitare le dispersioni energetiche dovute ad un eccesso di cicli on-off è l'adozione di un sistema ibrido, costituito da una pompa di calore, dimensionata per coprire solo parzialmente il carico di picco dell'edificio, accoppiata ad un secondo generatore di calore (generatore di back-up), costituito ad esempio da una resistenza elettrica o da una caldaia a gas. Tale sistema è definito anche "bivalente" perché utilizza due generatori accoppiati al posto di uno unico (sistema "monovalente"). Nel caso di sistemi bivalenti si possono distinguere due casi: quando i generatori sono alimentati con lo stesso vettore energetico, ovvero energia elettrica, il sistema è definito "monoenergetico". Al contrario, se i generatori impiegano due diversi tipi di vettori energetici come input, ad esempio energia elettrica e gas metano, il sistema è definito "bienergetico". Nel corso degli ultimi anni, diversi ricercatori hanno condotto analisi sull'ottimizzazione delle prestazioni energetiche dei sistemi ibridi, ma lo studio della letteratura evidenzia che manca ancora un'analisi completa sui tali sistemi.

Sono state quindi svolte una serie di simulazioni numeriche allo scopo di valutare l'influenza del dimensionamento della pompa di calore, delle perdite legate ai cicli on-off e della tipologia di sistema di back-up sulle prestazioni stagionali di un impianto di riscaldamento basato su un sistema ibrido. Tale sistema è ottenuto accoppiando una pompa di calore aria-acqua monocompressore non modulante ad un dispositivo di back-up (resistenza elettrica o caldaia a gas). È stato sviluppato il modello dinamico del sistema su TRNSYS 17 e sono state effettuate diverse simulazioni per valutare il rendimento energetico stagionale dell'impianto, accoppiato ad un edificio monofamiliare situata a Bolzano, e confrontarlo con quello di un sistema di riscaldamento monovalente basato esclusivamente su una pompa di calore aria-acqua o su una caldaia a gas. Sono stati calcolati i risparmi energetici ottenibili impiegando un sistema ibrido in cui i due generatori lavorano in modalità parallela o alternativa ed è stata studiata l'influenza della temperatura di cut-off sul rendimento stagionale del sistema.

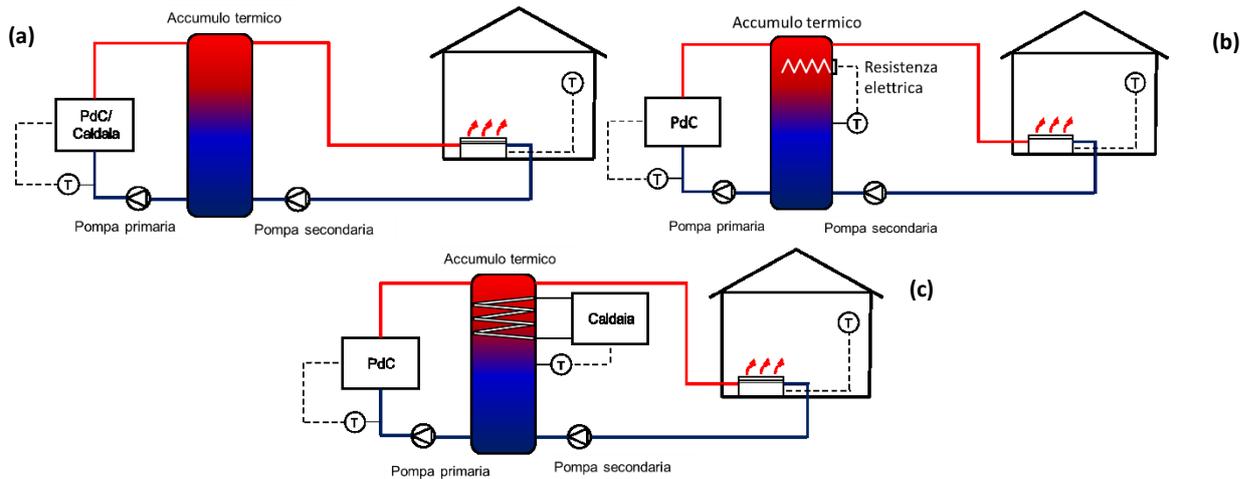
In Figura 8 sono rappresentate le possibili modalità di funzionamento di un sistema ibrido. La temperatura bivalente,  $T_{biv}$ , è definita come la temperatura dell'aria esterna  $T_{ext}$  in corrispondenza della quale il carico termico dell'edificio (linea nera in Figura 7) è pari alla capacità termica della pompa di calore (linea rossa). Per valori di  $T_{ext}$  maggiori di  $T_{biv}$  la pompa di calore è l'unico generatore attivo in quanto la sua capacità termica supera il carico richiesto dall'edificio. Al contrario, per valori di temperatura dell'aria esterna inferiori a  $T_{biv}$ , il carico dell'edificio è maggiore della potenza erogabile dalla pompa di calore e viene attivato quindi il secondo generatore di calore (back-up). La temperatura di cut-off ( $T_{cut-off}$ ) è definita come la temperatura dell'aria esterna in corrispondenza della quale viene spenta la pompa di calore secondo la strategia di controllo dell'impianto; in questo caso, per  $T_{ext} < T_{cut-off}$ , il sistema di back-up è l'unico generatore attivo. Se  $T_{cut-off} = T_{biv}$ , c'è sempre un solo generatore di calore in funzione durante l'intera stagione di riscaldamento: la pompa di calore per  $T_{ext} > T_{biv}$ , il generatore di backup per  $T_{ext} < T_{biv}$  ed il sistema ibrido funziona in modalità alternativa. Al contrario, se  $T_{cut-off} < T_{biv}$ , entrambi i generatori sono attivi per  $T_{cut-off} < T_{ext} < T_{biv}$  ed il sistema funziona come un sistema ibrido parallelo. La temperatura esterna di progetto,  $T_{des}$ , è la temperatura dell'aria esterna corrispondente al carico di picco dell'edificio. Se  $T_{cut-off} = T_{des}$ , l'impianto lavora in modalità puramente parallela.



**Figura 8. Modalità di funzionamento di un sistema ibrido pompa di calore-generatore di back-up.**

### 3.4.2 Modellazione del caso studio

È stata considerata un edificio unifamiliare costruito negli anni '90 a Bolzano. L'edificio si compone di sette vani, posti su un unico piano, ed è caratterizzato da una superficie netta di 134 m<sup>2</sup> e da un volume lordo riscaldato di 382 m<sup>3</sup>. Un attico non riscaldato si trova al piano superiore. Il livello di isolamento delle strutture opache e trasparenti è tipico del periodo di costruzione. La temperatura di set-point è stata impostata pari a 20°C e non è stata considerata attenuazione notturna: l'impianto di riscaldamento è costantemente acceso durante la stagione fredda, che va dal 15 ottobre al 15 aprile. Tramite TRNSYS è stato valutato il fabbisogno energetico dell'edificio impiegando il Test Reference Year di METEONORM [30] per Bolzano. Il carico di progetto dell'edificio in corrispondenza della temperatura esterna di progetto di Bolzano (-9°C) corrisponde a 8.9 kW.

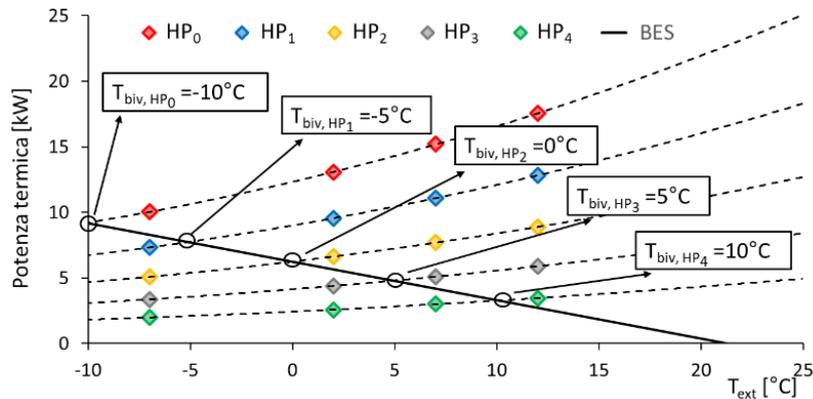


**Figura 9. Schema delle configurazioni impiantistiche simulate: sistema monovalente a pompa di calore/caldaia (a), sistema bivalente monoenergetico a pompa di calore e resistenza elettrica (b), sistema bivalente bienergetico a pompa di calore e caldaia (c).**

Al fine di valutare l'influenza del dimensionamento della pompa di calore, della tipologia di back-up e della strategia di controllo sui consumi energetici stagionali, sono state esaminate diverse configurazioni dell'impianto di riscaldamento abbinato all'edificio. Il layout dei sistemi simulati è riportato in Figura 9. Il sistema monovalente basato su una pompa di calore elettrica aria-acqua o una caldaia a gas (Figura 9(a)) è stato considerato come caso di riferimento. In questo tipo di impianto, la pompa di calore, o la caldaia, è l'unico generatore di calore e fornisce l'energia termica necessaria all'edificio durante tutta la stagione di riscaldamento. Per tale motivo, la pompa di calore deve essere dimensionata in modo da coprire l'intero carico di progetto. Nel sistema ibrido rappresentato in Figura 9(b), la taglia della pompa di calore è invece ridotta, perché viene aggiunta come sistema di back-up una resistenza elettrica, posta all'interno dell'accumulo termico. La taglia della pompa di calore è ridotta anche nell'ultimo layout considerato, ovvero sistema ibrido bivalente bienergetico con caldaia a gas accoppiata all'accumulo tramite uno

scambiatore di calore a serpentina (Figura 9(c)). In tutti i casi, gli emettitori adottati sono fan-coil a due tubi ed a 3 velocità ed ogni zona termica riscaldata è dotata di una unità terminale.

La pompa di calore selezionata, denominata  $HP_0$ , è una pompa di calore commerciale i cui valori di potenza termica e  $COP$  sono stati ricavati dalle schede tecniche del costruttore. Anche i dati prestazionali della caldaia sono stati ricavati dalle schede tecniche di un modello a condensazione commerciale, così come i dati geometrici e termofisici di un serbatoio commerciale da 150 litri, ben coibentato (trasmittanza del mantello  $1.8 \text{ W/m}^2\text{K}$ ). Per quantificare l'influenza del dimensionamento della pompa di calore sulle prestazioni energetiche complessive, sono state eseguite simulazioni considerando 5 diverse taglie di pompe di calore ( $HP_0$ ,  $HP_1$ ,  $HP_2$ ,  $HP_3$  e  $HP_4$ ), con capacità termica nominale a  $T_{ext} = 7^\circ\text{C}$  che diminuisce da  $15.2 \text{ kW}$  a  $3 \text{ kW}$  passando dall'unità  $HP_0$  all'unità  $HP_4$ . Nella Figura 10 sono rappresentate in funzione di  $T_{ext}$  le curve di potenza termica delle pompe di calore considerate, assieme alla firma energetica dell'edificio. Come si può notare dalla figura, diminuendo la taglia della pompa di calore, aumenta il valore di  $T_{biv}$  e diminuisce di conseguenza la quota di potenza termica richiesta dall'edificio coperta dalla pompa di calore (dal 100% con la  $HP_0$  al 21% con la  $HP_4$ ). Sono stati quindi considerati i casi in cui l'impianto è costituito dalla sola pompa di calore  $HP_0$  (caso 1), dalle pompe di calore  $HP_1$ - $HP_4$  con resistenza elettrica di back-up (casi 2-5), dalle pompe di calore  $HP_1$ - $HP_4$  con caldaia di back-up (casi 6-9), dalla sola caldaia (caso 10).



**Figura 10. Firma energetica dell'edificio e potenza termica delle pompe di calore a pieno carico.**

### 3.4.3 Discussione dei risultati

I componenti del sistema ibrido sono stati modellati su TRNSYS 17 considerando anche, a differenza di gran parte degli articoli che analizzano sistemi ibridi, le perdite di energia dovute ai cicli on-off. Per ciascuna configurazione del sistema di riscaldamento considerato (casi 1-10), sono state effettuate simulazioni per tutta la stagione di riscaldamento. Per confrontare le prestazioni stagionali delle varie configurazioni di impianto sono impiegati i seguenti indici:

$$SCOP_{net} = \frac{\sum_{year} E_{th,HP}}{\sum_{year} E_{el,HP}} ; \quad \eta_g = \frac{\sum_{year} E_{th,B}}{\sum_{year} E_{abs,B}} \quad (1)$$

$$\eta_s = \frac{\sum_{year} (E_{th,HP} + E_{th,EH})}{\sum_{year} (E_{el,HP} + E_{el,EH}) f_{p,el}} \text{ per i casi 2-5;} \quad \eta_s = \frac{\sum_{year} (E_{th,HP} + E_{th,B})}{\sum_{year} (E_{el,HP} f_{p,el} + E_{abs,B} f_{p,gas})} \text{ per i casi 6-9} \quad (2)$$

dove  $E_{th,HP}$ ,  $E_{th,B}$  e  $E_{th,EH}$  sono rispettivamente l'energia termica fornita all'edificio dalla pompa di calore, dalla caldaia e dalle resistenze elettriche;  $E_{el,HP}$ ,  $E_{el,EH}$  e  $E_{abs,B}$  sono l'energia elettrica consumata dalla pompa di calore e dalle resistenze elettriche e l'energia termica consumata dalla caldaia;  $f_{p,el}$  e  $f_p$  sono i fattori di conversione in energia primaria per l'elettricità ed il gas naturale (per l'Italia, rispettivamente pari a 2.42 e 1.05). Il parametro  $SCOP_{net}$  è il coefficiente di prestazione stagionale legato alla sola pompa di calore, mentre  $\eta_g$  è il rendimento stagionale della caldaia a gas. Il parametro  $\eta_s$  è invece il coefficiente di

prestazione stagionale dell'impianto ibrido in cui sono presenti due generatori, con diversa definizione per sistema monoenergetico (casi 2-5) e bienergetico (casi 6-9).

In Figura 11 sono riportati i valori di energia primaria consumata dal generatore di calore e dal sistema di back-up, oltre al numero annuo di cicli on-off effettuati dal generatore principale per tutte le configurazioni impiantistiche considerate. I risultati evidenziano come la taglia della pompa di calore in un sistema ibrido influenza fortemente il numero di cicli on-off eseguiti dall'unità: passando dal caso 1 ( $T_{biv} = -10^{\circ}\text{C}$ ) ai casi 5 e 9 ( $T_{biv} = 10^{\circ}\text{C}$ ), il numero di cicli diminuisce fino al 90%, aumentando la vita operativa della pompa di calore. Il consumo di energia primaria dell'impianto è invece caratterizzato da un andamento diverso: presenta un minimo per le configurazioni 3 e 7 ( $T_{biv} = 0^{\circ}\text{C}$ ) e se la taglia della pompa viene ulteriormente ridotta, il consumo energetico totale aumenta notevolmente (casi 5 e 10 in figura). La tipologia di back-up influenza l'efficienza energetica del sistema di riscaldamento: a parità di taglia della pompa di calore, l'utilizzo di un back-up elettrico porta ad un consumo di energia primaria maggiore rispetto all'utilizzo di una caldaia a gas, fino al 130% (si confrontino i casi 5 e 9 in figura). I risultati evidenziano inoltre che più diminuisce la taglia della pompa di calore, più cala il numero di cicli on-off: se la pompa di calore è sottodimensionata rispetto al carico di progetto, funziona per un tempo maggiore a pieno carico.

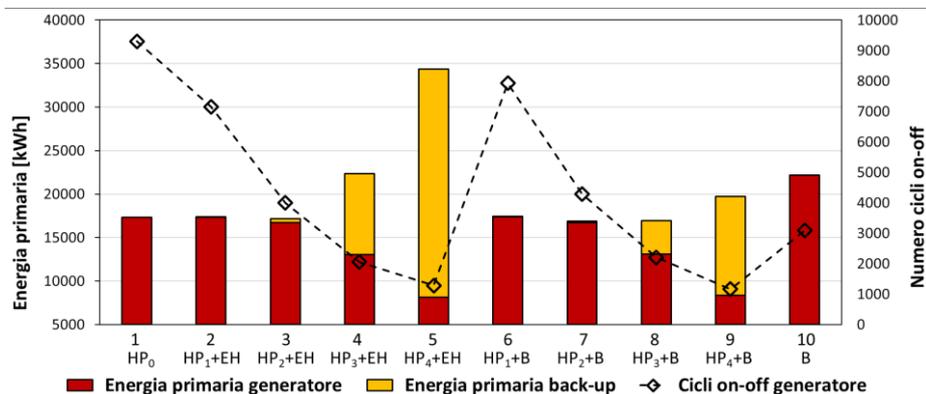


Figura 11. Energia primaria totale consumata dall'impianto e numero di cicli on-off annuali.

I risultati delle simulazioni effettuate hanno rilevato che, maggiore è la temperatura di cut-off, maggiore è la prestazione energetica della sola pompa di calore ( $SCOP_{net}$ ), ma minore è l'efficienza stagionale del sistema ( $\eta_s$ ). Infatti, per valori più elevati di  $T_{cut-off}$  la pompa di calore eroga e consuma una minore quantità di energia, mentre risulta maggiore l'energia termica fornita e consumata dal sistema di back-up. Il valore massimo di  $\eta_s$  si ottiene quando  $T_{cut-off}$  è pari a  $-10^{\circ}\text{C}$ , prossima alla temperatura esterna di progetto, quindi quando il sistema funziona in modalità puramente parallela. Soprattutto per gli impianti ibridi caratterizzati da una pompa di calore di piccola taglia, l'utilizzo di una configurazione in parallelo permette di diminuire fortemente l'energia termica erogata dal sistema di back-up e quindi di aumentare le prestazioni stagionali dell'impianto.

Nella Tabella 5 sono riportati i coefficienti di prestazione stagionale ottenuti dalle simulazioni nei vari casi. Vengono riportati solo i coefficienti corrispondenti alla soluzione con  $T_{cut-off}$  pari a  $-10^{\circ}\text{C}$ , che minimizza la richiesta di energia primaria. Le configurazioni che consentono di ottenere la migliore efficienza stagionale sono la 3 per il sistema monoenergetico e la 7 per il sistema bienergetico, caratterizzate da una temperatura bivalente di  $0^{\circ}\text{C}$ . L'adozione di queste configurazioni, con modalità di funzionamento puramente parallela, porta ad un risparmio di energia primaria di circa il 2-3% rispetto al sistema monovalente basato sulla sola pompa di calore (caso 1) e di circa il 32-34% rispetto al sistema monovalente caratterizzato dalla sola caldaia a gas (caso 10). È inoltre evidente dalla tabella che, al diminuire della taglia della pompa di calore (cioè per valori di  $T_{biv}$  maggiori), aumenta il  $SCOP_{net}$ : ciò è principalmente dovuto alla significativa diminuzione del numero di cicli on-off effettuati dalla pompa di calore. Ciononostante, l'andamento dell'efficienza complessiva dell'impianto,  $\eta_s$ , presenta un massimo in corrispondenza di  $T_{biv} = 0^{\circ}\text{C}$  e per valori superiori diminuisce drasticamente a causa della maggiore energia consumata dal sistema di back-up, soprattutto se vengono impiegate resistenze elettriche.

**Tabella 5. Coefficienti di prestazione stagionale dei diversi sistemi.**

Caso	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$SCOP_{net}$	3.11	3.14	3.22	3.37	3.40	3.13	3.22	3.37	3.36	/
$\eta_g$	/	/	/	/	/	1.03	1.02	1.02	1.01	1.04
$\eta_s$	1.28	1.30	1.31	0.99	0.65	1.29	1.32	1.30	1.14	0.99

In conclusione, i risultati indicano che l'adozione di un sistema ibrido con funzionamento puramente in parallelo (ovvero con temperatura di cut-off pari alla temperatura esterna di progetto), permette di ottenere significativi risparmi energetici, dal 12% al 16% rispetto ad una modalità di funzionamento alternativa (ovvero con temperatura di cut-off pari alla temperatura bivalente). L'efficienza stagionale maggiore è stata ottenuta con la pompa di calore dimensionata per coprire circa la metà del carico di picco dell'edificio: in questo modo è infatti possibile conseguire una significativa riduzione dei cicli on-off dell'unità. Nel caso di una pompa di calore di piccola taglia, il sistema ibrido non è in grado di sfruttare appieno il suo potenziale di risparmio energetico, poiché una parte apprezzabile del fabbisogno energetico dell'edificio viene soddisfatta dal sistema di back-up, caratterizzato da una bassa efficienza energetica.

### 3.5 Modellazione dinamica di pompe di calore polivalenti

#### 3.5.1 Background

Considerando il fabbisogno energetico complessivo del settore residenziale, attualmente il riscaldamento degli ambienti durante la stagione invernale rappresenta la quota maggioritaria di tali consumi, seguita dal condizionamento estivo, dall'illuminazione e dalla produzione di acqua calda sanitaria (ACS). Ciononostante, prendendo in esame i soli consumi energetici legati alla produzione di energia termica, la preparazione di ACS ha rappresentato nel 2013 circa il 19% del fabbisogno energetico totale degli edifici residenziali europei [41]. Inoltre, la rilevanza dei consumi energetici legati alla produzione di ACS è in continuo aumento negli edifici nZEB: grazie al significativo miglioramento nell'isolamento termico dell'involucro edilizio, è stato possibile ridurre fortemente il fabbisogno energetico per la climatizzazione degli ambienti, mentre la richiesta di acqua calda non può essere ridotta allo stesso modo. Per questo motivo, il peso dei consumi di energia per la produzione di ACS potrebbe raggiungere il 50% del fabbisogno energetico totale degli edifici nZEB nel corso dei prossimi anni [42].

Le pompe di calore sono considerate un ottimo strumento per diminuire i consumi energetici complessivi degli edifici residenziali e rappresentano un'efficace alternativa ai sistemi tradizionali, come caldaie e resistenze elettriche, per la produzione di ACS. Sul mercato, sono attualmente disponibili diverse soluzioni per soddisfare in maniera efficiente la richiesta di acqua calda.

Inoltre, si osserva come durante una parte significativa della stagione estiva si registra una contemporanea richiesta di energia termica per la produzione di ACS e di energia frigorifera per la climatizzazione degli ambienti. Le pompe di calore reversibili tradizionali, quando funzionano in modalità raffrescamento, scaricano il calore di condensazione alla sorgente esterna (solitamente aria), semplicemente dissipandolo. Questa energia termica di scarto potrebbe essere recuperata e utilizzata per preparare acqua calda: tale principio di funzionamento è alla base delle pompe di calore polivalenti.

#### 3.5.2 Descrizione del caso studio

In questa sezione verranno riportati i principali risultati ottenuti per mezzo di un'analisi in regime dinamico condotta su una pompa di calore reversibile polivalente del tipo aria-acqua, accoppiata ad un edificio residenziale. La pompa di calore è caratterizzata da tre scambiatori di calore: una batteria a tubi alettati per lo scambio termico refrigerante/aria e due scambiatori di calore a piastre per lo scambio termico refrigerante/acqua. Il modello dinamico dell'unità è stato sviluppato tramite il software TRNSYS 17. Maggiori informazioni sull'analisi svolta possono essere trovate in [43].

In questo lavoro è stato considerato un edificio unifamiliare ubicato a Palermo, di superficie utile pari a 70 m<sup>2</sup>, caratterizzato da un involucro edilizio che rispetta gli attuali valori limite di legge. Il periodo di raffrescamento estivo è stato fissato pari a 6 mesi, corrispondenti al periodo da maggio ad ottobre. Il

fabbisogno energetico per la produzione di ACS è stato valutato secondo la norma UNI/TS 11300-2: secondo la metodologia riportata, il fabbisogno giornaliero di acqua calda dell'edificio simulato è pari a quasi 120 litri. Inoltre, per definire il prelievo di acqua calda è stato utilizzato il profilo orario introdotto dalla norma UNI/TS 11300-4, che prevede una richiesta piuttosto distribuita durante il corso della giornata, con un prelievo massimo di ACS uguale a 16 l/h. L'impianto di condizionamento utilizza fan-coil a due tubi come terminali di emissione, mentre un accumulo di acqua tecnica da 300 litri viene utilizzato per la produzione istantanea di ACS per mezzo di una serpentina interna collegata alla pompa di calore. In Figura 12 è riportato il layout complessivo del modello dinamico sviluppato.

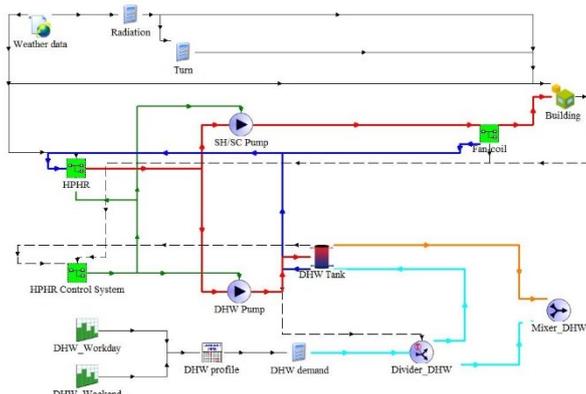


Figura 12. Layout del modello dinamico edificio-impianto sviluppato in ambiente TRNSYS.

La pompa di calore polivalente può operare in tre possibili modalità: riscaldamento, per la produzione di energia termica per il condizionamento invernale o per la preparazione di ACS, raffreddamento, per la climatizzazione estiva degli ambienti e recupero totale, per la fornitura contemporanea di energia frigorifera per la climatizzazione e termica per la produzione di ACS. A seconda della modalità di funzionamento dell'unità, il fluido refrigerante percorre un diverso circuito. Lo scambio termico tra il refrigerante e l'aria esterna avviene all'interno della batteria a tubi alettati, che funge da evaporatore e condensatore rispettivamente in modalità di riscaldamento e raffreddamento, mentre essa è esclusa in modalità recupero totale. Lo scambiatore a piastre lato utenza ha invece la funzione di produrre acqua calda (fredda) per il riscaldamento (raffreddamento): per questo motivo funge da condensatore dell'unità durante la stagione invernale per il riscaldamento degli ambienti e da evaporatore durante le modalità raffreddamento e recupero totale. Infine, lo scambiatore a piastre dedicato alla produzione di ACS è attivo solo quando è richiesta acqua calda sanitaria (con o senza richiesta contemporanea di energia frigorifera): tale elemento funziona sempre da condensatore. In Figura 13 è riportato lo schema idraulico della pompa di calore polivalente simulata. I dati prestazionali della macchina sono stati forniti dal produttore per tutte le possibili modalità di funzionamento.

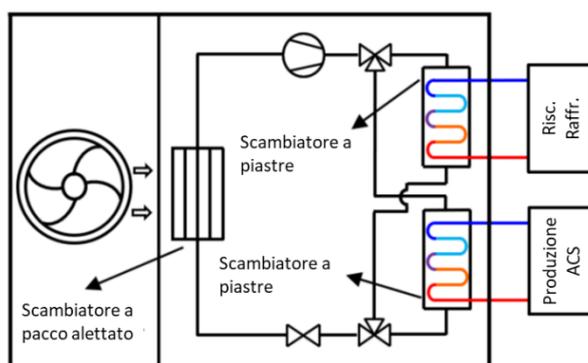


Figura 13. Circuito idraulico interno alla pompa di calore polivalente simulata.

All'interno di TRNSYS è stato inoltre sviluppato il sistema di controllo della pompa di calore, che permette di selezionare e attivare la modalità di funzionamento della macchina in corrispondenza delle diverse richieste provenienti dall'edificio. In particolare, la modalità raffrescamento è attivata quando le zone termiche necessitano di essere raffrescate. In questo caso, la variabile monitorata utilizzata dal sistema di controllo è la temperatura dell'acqua di ritorno dall'impianto (temperatura di ingresso alla pompa di calore). Poiché la pompa di calore simulata è monostadio, il compressore ha solo due possibili modalità operative: acceso o spento. Per questo motivo, viene adottata una logica di tipo on-off, basata su un ciclo di isteresi: se la pompa di calore è spenta, essa si attiva quando la temperatura di ritorno è maggiore di una certa soglia. In seguito, la macchina viene spenta quando tale temperatura scende al di sotto di un altro valore di soglia. Il controllo della modalità produzione ACS si basa invece sulla temperatura dell'acqua all'interno dell'accumulo. Nello specifico, quando la temperatura nella parte superiore dell'accumulo scende al di sotto di un valore di soglia ( $T_{ON,ACS}$ ) a seguito di un prelievo di acqua calda, la pompa di calore opera in modalità produzione ACS. Tale modalità rimane attiva fino a quando il serbatoio non è completamente caricato: quando la temperatura nella parte inferiore dell'accumulo supera un secondo valore di soglia ( $T_{OFF,ACS}$ ), la pompa di calore si spegne. È importante sottolineare che i valori di entrambi i parametri devono essere impostati per garantire una temperatura dell'acqua calda sanitaria in uscita dall'accumulo superiore a 40°C. La modalità recupero totale viene attivata solo con una richiesta contemporanea di energia frigorifera e termica per la produzione di ACS. Per questo motivo, la pompa di calore opera in recupero totale quando la temperatura di ritorno dall'impianto è maggiore della soglia impostata e la temperatura nel serbatoio di accumulo diminuisce a seguito di un prelievo di acqua calda.

Al fine di estendere la durata della modalità recupero totale, il valore dei parametri di soglia per la gestione del serbatoio di accumulo sono stati diversificati a seconda della richiesta di energia frigorifera dall'edificio. In particolare, entrambi i valori di soglia vengono aumentati e vengono identificati come  $T_{ON,RT}$  e  $T_{OFF,RT}$  durante la modalità di recupero totale.

### 3.5.3 Discussione dei risultati

Sono state eseguite diverse simulazioni numeriche per valutare le prestazioni energetiche ottenibili dalla pompa di calore al variare dei parametri di controllo per la gestione delle diverse modalità operative. In particolare, l'analisi dei risultati ha riguardato la valutazione delle prestazioni energetiche stagionali della pompa di calore durante la stagione di raffrescamento e la percentuale del fabbisogno energetico stagionale per la produzione di ACS coperto durante la modalità recupero totale. In Tabella 6 sono riportati i principali risultati ottenuti al variare dei parametri di controllo ( $T_{OFF,ACS} - T_{ON,ACS} / T_{OFF,RT} - T_{ON,RT}$ ). Nello specifico, i valori dei parametri  $T_{OFF,ACS}$  e  $T_{ON,ACS}$  sono stati variati all'interno degli intervalli [35°C-42°C] e [43°C-45°C], mentre i valori dei parametri  $T_{OFF,RT}$  e  $T_{ON,RT}$  sono stati variati all'interno degli intervalli [40°C-47°C] e [43°C-50°C].

**Tabella 6. Prestazioni della pompa di calore polivalente durante la stagione estiva al variare dei parametri di controllo.**

$(T_{OFF,ACS} - T_{ON,ACS} / T_{OFF,RT} - T_{ON,RT})$	Servizio	Energia fornita PdC [kWh]	Energia elettrica PdC [kWh]	SPF	Fabbisogno ACS coperto in modalità recupero totale [%]
40°C-43°C / 40°C-43°C	Raffr.	3246	762	4.25	0.18
	ACS	1525	368	3.93	
	Totale	4771	1149	4.15	
35°C-43°C / 40°C-43°C	Raffr.	327	762	4.25	0.05
	ACS	1517	368	4.13	
	Totale	4764	1130	4.23	
40°C-43°C / 42°C-45°C	Raffr.	3246	762	4.25	0.05
	ACS	1525	388	3.93	
	Totale	4771	1150	4.15	
40°C-43°C / 47°C-50°C	Raffr.	3246	782	4.15	24.85
	ACS	1530	295	5.18	
	Totale	4775	1077	4.43	
42°C-45°C / 47°C-50°C	Raffr.	3247	793	4.10	30.13
	ACS	1532	263	5.83	
	Totale	4779	1056	4.53	

Analizzando i risultati ottenuti, si osserva come il setting ottimale dei parametri di controllo del sistema ( $T_{OFF,ACS} - T_{ON,ACS} / T_{OFF,RT} - T_{ON,RT}$ ) è pari a (42°C-45°C / 47°C-50°C). Con questi valori, il coefficiente di prestazione energetica stagionale della pompa di calore *SPF* (definito come il rapporto fra l'energia complessivamente erogata dall'unità e l'energia elettrica consumata dalla stessa) aumenta di circa il 9% rispetto alla configurazione di riferimento, in cui non vi è nessuna differenziazione fra i valori assunti dai parametri di controllo nelle due modalità operative ( $T_{OFF,ACS}$  e  $T_{OFF,RT}$  pari a 40°C e  $T_{ON,ACS}$  e  $T_{ON,RT}$  pari a 43°C). Tale risultato è legato ad un duplice effetto: in primo luogo le prestazioni energetiche stagionali della pompa di calore per il solo servizio di raffrescamento diminuiscono di circa il 3%, mentre il *SPF* legato alla produzione di ACS migliora di circa il 48%. In modalità recupero totale, infatti, l'efficienza della pompa di calore è leggermente ridotta a causa della temperatura di condensazione più elevata, ma è possibile sfruttare in maniera del tutto gratuita l'energia termica scaricata al condensatore per produrre ACS. È stato dimostrato come sia possibile estendere la durata della modalità di funzionamento in regime di recupero totale aumentando il valore di entrambi i parametri di soglia che gestiscono il funzionamento della pompa di calore. I risultati riportati in Tabella 6 evidenziano come utilizzando la configurazione di riferimento meno dell'1% del fabbisogno energetico legato alla produzione di ACS sia soddisfatto in modalità recupero totale (0.18% per la precisione). Tale percentuale supera invece il 30% nel caso in cui si utilizzi la configurazione ottimale della logica di controllo implementata.

In definitiva, i risultati riportati permettono di affermare come l'utilizzo di pompe di calore polivalenti sia una soluzione promettente per ridurre i consumi energetici complessivi degli edifici residenziali e non residenziali durante la stagione estiva. Grazie alla modalità recupero totale, infatti, è possibile produrre acqua calda sanitaria in maniera pressoché gratuita a partire dal calore scaricato al condensatore della pompa di calore. I risultati delle simulazioni numeriche effettuate confermano come le prestazioni del sistema possano essere ottimizzate estendendo il tempo di utilizzo della pompa di calore in questa modalità operativa, andando ad agire sulla logica di controllo del sistema, variando il settaggio dei relativi parametri, in base all'effettiva modalità operativa della macchina.

## 4 Analisi del ciclo di vita (LCA) di un impianto geotermico: caso studio

Lo scopo di questa sezione è valutare il ciclo di vita (Life Cycle Assessment - LCA) dell'impianto geotermico in corso di realizzazione presso il C.R. Enea-Casaccia (Roma) e di confrontarlo con un sistema tradizionale (ASHP). L'analisi dell'LCA rappresenta uno dei principali strumenti per analizzare e quantificare gli impatti potenziali sull'ambiente da parte di ogni componente, a partire dall'acquisizione delle materie prime, attraverso la produzione e l'utilizzo, fino al trattamento di fine vita, riciclaggio e smaltimento finale (*decommissioning*). Il campo geosonde, costituito da tubi in polietilene ad andamento verticale, configurazione double U (due tubi di mandata e due tubi di ritorno), inserite in quattro fori a diversa profondità (100 m, 35 m, 50 m, e 80 m), sarà direttamente accoppiato ad una pompa di calore geotermica (acqua-acqua). La valutazione comparativa dell'LCA dei vari componenti dei due sistemi sarà condotta con il software Simapro 9.0

Il sistema GSHP considerato è un sistema a circuito chiuso, costituito da quattro pozzi a diverse profondità (100 m, 35 m, 50 m e 80 m), dotati di sonde geotermiche a configurazione double U di diametro 32 mm, con layout verticale per ogni pozzo. Il numero dei pozzi e la loro profondità sono stati dimensionati in funzione dei carichi termici di punta richiesti dall'utenza sia in riscaldamento (13,45 kW) che in raffrescamento (13,69 kW). In particolare, il dimensionamento di massima si riferisce ad un'utenza adibita ad ufficio del C.R. Enea-Casaccia, di superficie pari a 140 m<sup>2</sup> e di altezza 2,7 m. Per la metodologia e la procedura di calcolo dei dati di progetto si rimanda al Report RdS/PTR (19-21)/026, I annualità [44].

La conducibilità termica media del terreno è stata assunta pari a 2 W/[m K], in quanto le formazioni geologiche che caratterizzano l'area sono di tipo vulcanico – a cui corrisponde una resa termica di 61,2 W/m. In letteratura sono disponibili numerosi studi sull'impatto ambientale delle pompe di calore geotermiche ma principalmente valutano le emissioni di CO<sub>2</sub> in atmosfera. La pompa di calore tradizionale (ASHP) utilizza l'aria dell'atmosfera esterna, la cui temperatura varia durante il giorno e con il ciclo stagionale. Pertanto, la stessa, fornisce all'utenza il desiderato fabbisogno termico a fronte di un consumo di energia fortemente condizionato dalle condizioni climatiche.

### 4.1 Introduzione all'analisi LCA

Il termine LCA fu usato per la prima volta in occasione di un congresso della SETAC (*Society of Environmental Toxicology And Chemistry*), svoltosi nel 1990 nel Vermont, che ne fornì anche una definizione: l'LCA è un procedimento oggettivo di valutazione di carichi energetici ed ambientali relativi ad un processo o un'attività, effettuato attraverso l'identificazione dell'energia, dei materiali usati e dei rifiuti rilasciati nell'ambiente. La valutazione include l'intero ciclo di vita del processo o attività, comprendendo l'estrazione e il trattamento delle materie prime, la fabbricazione, il trasporto, la distribuzione, il riuso, il riciclo e lo smaltimento finale [45 - 46].

L'LCA è un metodo analitico ben noto per quantificare l'impatto ambientale di prodotti o attività durante il loro intero ciclo di vita seguendo un approccio "dalla culla alla tomba".

Lo studio dell'LCA prevede quattro fasi (Figura 1) [47 -48]:

- a) definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione [49];
- b) analisi dell'inventario;
- c) valutazione degli impatti;
- d) interpretazione.

Il campo di applicazione, insieme ai limiti del sistema e al livello di dettaglio dipendono dal soggetto e dall'utilizzo previsto dallo studio. È la prima fase di uno studio LCA, nel quale oltre a descrivere il sistema, viene definito anche lo scopo e le applicazioni dello studio LCA. Tale fase è la più importante, in quanto permette di coordinare e gestire tutte le altre fasi dello studio sull'LCA. È necessario, definire l'unità funzionale (UF) e i confini del sistema. L'UF è l'unità di misura della funzione fornita dal sistema, cioè il prodotto, il servizio o la funzione su cui impostare l'analisi e il confronto con le possibili alternative (kg di prodotto, kWh di energia fornita, etc). Essa, indica l'oggetto di riferimento a cui i dati dei flussi di input e di output saranno normalizzati. È un riferimento comune necessario affinché sia possibile comparare i risultati dell'LCA, soprattutto quando si valutano contemporaneamente sistemi diversi. È importante definire i

confini del sistema, in quanto permettono di identificare le singole operazioni (unità) che compongono il processo studiato [50].

La fase di analisi dell'inventario del ciclo di vita (LCI - *Life Cycle Inventory*) è la seconda fase dell'LCA. Si tratta dell'inventario dei dati in ingresso e in uscita, in termini di bilanci di materia ed energia e di rilasci nell'ambiente (impatti) [51].

Negli ultimi anni sono stati sviluppati numerosi database, sia pubblici che privati, anche sotto forma di diagrammi di flusso. Questi ultimi, tramite rappresentazione grafica, permettono di individuare, per le diverse unità di processo che costituiscono il sistema, i dati di input e output di energia e materia.

La fase di valutazione dell'impatto del ciclo di vita (LCIA - *Life Cycle Impact Assessment*) è la terza fase dell'LCA. Lo scopo dell'LCIA consiste nella classificazione e nella caratterizzazione degli impatti ambientali in base agli effetti che possono provocare e nel calcolo del valore che assumono i parametri scelti come indicatori dei singoli effetti o categorie di impatto, al fine di ottenere il cosiddetto ecoprofilo del prodotto [52].

In questa fase è necessario scegliere il modello di caratterizzazione e, conseguentemente, le categorie di impatto e gli indicatori di categoria. Lo scopo ultimo è di ottenere un risultato degli indicatori per ogni categoria di impatto.

L'interpretazione del ciclo di vita è la fase finale della procedura LCA, ovvero è la fase di interpretazione e decisione, o *improvement assessment*, che consiste nell'esaminare i risultati raggiunti e nel comunicarli al committente e quindi nel prendere decisioni in base ad essi [53].

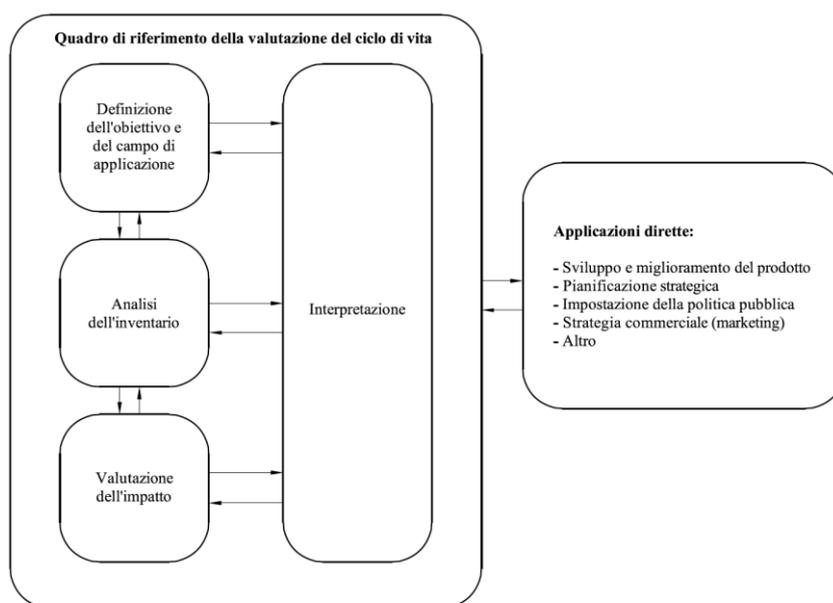


Figura 1. Fasi dell'LCA (Fonte: UNI EN ISO 14040)

Pertanto, un sistema può avere un gran numero di funzioni possibili e la/e funzione/i scelta/e per lo studio dipende dall'obiettivo e dal campo di applicazione dell'LCA. L'LCA risulta un approccio relativo, strutturato attorno a una UF; tutte le analisi successive sono relative all'UF, come tutti gli elementi in ingresso e in uscita dell'LCI e di conseguenza il profilo LCIA sono correlati all'UF. Le singole fasi dell'LCA utilizzano i risultati di tutte le altre fasi. Perciò, l'approccio iterativo all'interno e tra le fasi contribuisce alla completezza e alla coerenza dello studio e dei risultati prodotti.

#### 4.2 Caratteristiche fondamentali dell'LCA

La metodologia LCA esamina in modo sistematico gli aspetti ambientali e gli impatti legati ai sistemi del prodotto/componente, dall'acquisizione delle materie prime allo smaltimento finale, in conformità all'obiettivo e al campo di applicazione. In funzione di questi ultimi, il grado di dettaglio e l'estensione

temporale possono variare ampiamente. La metodologia LCA è molto diversa da altre tecniche (valutazione di impatto ambientale, valutazione del rischio), in quanto l'analisi è relativa all'UF scelta. La metodologia tratta i potenziali impatti ambientali, non in maniera assoluta e precisa, in quanto [48]:

- l'espressione relativa dei potenziali impatti ambientali è riferita ad un'unità di riferimento;
- l'integrazione dei dati ambientali viene eseguita nello spazio e nel tempo;
- vi è incertezza intrinseca nella modellazione degli impatti ambientali;
- la fase di LCIA, unitamente ad altre fasi LCA, fornisce una prospettiva a livello di sistema dei problemi ambientali e delle risorse per uno o più sistemi di prodotto;
- l'LCIA assegna i risultati dell'LCI alle categorie di impatto; per ogni categoria è selezionato un indicatore di categoria di impatto del ciclo di vita ed è calcolato il risultato di tale indicatore (risultato dell'indicatore);
- la raccolta dei risultati degli indicatori (risultati di LCIA) o il profilo LCIA forniscono informazioni sui problemi ambientali associati agli elementi in ingresso e in uscita del sistema di prodotto;
- non esistono basi scientifiche per la riduzione dei risultati dell'LCA a un singolo punteggio o numero complessivo;
- l'interpretazione del ciclo di vita richiede l'uso di un procedimento sistematico per identificare, qualificare, verificare, valutare e presentare le conclusioni sulla base delle risultanze dell'LCA, allo scopo di soddisfare i requisiti dell'applicazione come descritto nell'obiettivo e campo di applicazione dello studio;
- l'interpretazione del ciclo di vita richiede l'uso di un procedimento iterativo sia all'interno della fase di interpretazione che nelle altre fasi dell'LCA.

L'LCA modella il ciclo di vita di un prodotto come proprio sistema di prodotto, costituito da una serie di processi unitari, collegati fra loro da flussi di prodotti o rifiuti intermedi, ognuno caratterizzato dai dati di input e output. Tali flussi possono includere l'utilizzo di risorse e di emissioni nell'aria, nell'acqua e nel terreno associati al sistema. Questi dati sono i risultati dell'LCI e costituiscono l'elemento in ingresso per l'LCIA. In ogni caso, quando si definisce il confine del sistema, il quale comprende i processi unitari considerati con i relativi flussi di input e output, è necessario fare alcune considerazioni, come:

- acquisizione di materie prime;
- elementi in ingresso e in uscita nella sequenza principale di fabbricazione/processo;
- distribuzione/trasporto;
- produzione e utilizzo di combustibili, di elettricità e di calore;
- uso e manutenzione dei prodotti;
- smaltimento di rifiuti e prodotti di processo;
- recupero dei prodotti dopo l'uso (compresi il riutilizzo, il riciclaggio e il recupero di energia);
- fabbricazione dei materiali ausiliari;
- fabbricazione, manutenzione e dismissione delle attrezzature principali;
- operazioni aggiuntive, quali illuminazione e riscaldamento.

#### 4.2.1 Analisi di inventario (LCI)

L'analisi d'inventario (LCI) comprende la raccolta dei dati e i procedimenti di calcolo che consentono di quantificare gli elementi in ingresso e in uscita pertinenti al sistema che si vuole analizzare. È necessario definire le materie prime, il quantitativo di energia e i materiali ausiliari in ingresso, i prodotti/coprodotti e rifiuti finali, le emissioni in aria e gli scarichi nell'acqua e nel sottosuolo.

#### 4.2.2 Valutazione dell'impatto del ciclo di vita (LCIA)

La fase di valutazione dell'impatto dell'LCA ha lo scopo di valutare l'entità dei potenziali impatti sull'ambiente utilizzando i dati dell'LCI. Questo processo comporta l'associazione dei dati d'inventario a specifiche categorie di impatti ambientali e indicatori di categoria.

Le categorie di impatto che possono essere considerate sono, per esempio, il riscaldamento globale, l'acidificazione, l'eutrofizzazione, la produzione di ozono, l'ecotossicità dell'ecosistema, l'uso del territorio che condiziona la biodiversità, il consumo dei minerali, il consumo di combustibili fossili oppure il consumo di energia non rinnovabile. Ogni categoria di impatto viene misurata con la sua unità di misura e successivamente attribuita con pesi diversi alle categorie di danno (salute dell'uomo, qualità

dell’ecosistema, uso delle risorse, cambiamenti climatici). Nel passaggio dalle categorie di impatto alle categorie di danno le unità di misura possono cambiare o rimanere le stesse. Le categorie di danno vengono poi normalizzate per eliminare le unità di misura e pesate con una stessa unità di misura per ottenere un danno complessivo dell’oggetto di studio [54-56].

#### 4.2.3 Interpretazione dei dati

L’ultima fase del metodo LCA consiste nell’interpretazione dei dati, combinando tra loro i risultati ottenuti nell’analisi di inventario e nella valutazione d’impatto. Il risultato ultimo sarà coerente con l’obiettivo e con il campo di applicazione definito inizialmente, al fine di trarre conclusioni, limitazioni e raccomandazioni.

#### 4.3 Caso studio: confronto sistema geotermico GSHP e ASHP

In questo studio sono presentati i risultati LCA per la soluzione impiantistica considerata, attraverso la normalizzazione dei dati in ingresso e in uscita; ogni quantità di materiale consumato o sostanza rilasciata nell’ambiente farà riferimento alla produzione di 1 kW di energia termica (UF).

Il ciclo di vita e gli impatti ambientali impliciti dei sistemi GSHP e ASHP vengono qui valutati e confrontati, a beneficio di coloro che operano nel campo della progettazione degli impianti per edifici a basso impatto in termini di emissioni di CO<sub>2</sub>. Il confine del sistema GSHP e della pompa di calore ad aria è illustrato nella Figura 2.

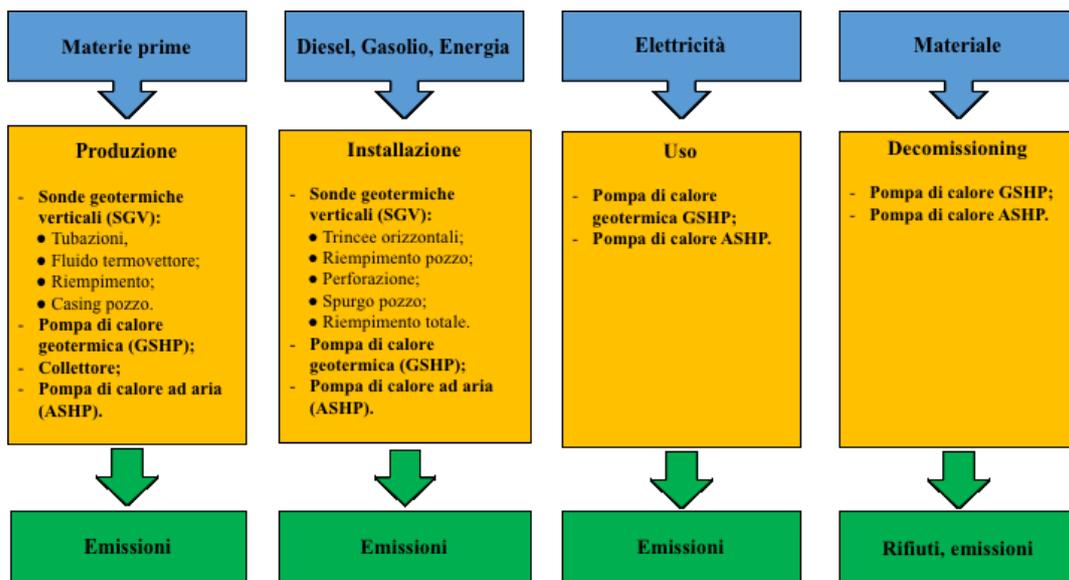


Figura 2. Confine del Sistema GSHP e ASHP

Nei box in giallo sono riportate le diverse fasi del ciclo di vita considerato (produzione, installazione, uso e decommissioning) e i componenti analizzati per ognuna di essa.

Le frecce in blu indicano i dati di input, mentre i dati di output, riferiti ad ogni fase del ciclo di vita, sono riportati in verde. La fase di decommissioning è stata considerata solo per le due tipologie di pompe di calore, in quanto per le sonde geotermiche verticali e il collettore è stata considerata una vita utile pari a 100 anni, per cui si prestano a più cicli operativi della pompa di calore geotermica. Il refrigerante considerato è l’R32, omesso nella valutazione del ciclo di vita, in quanto caratterizzato da un valore basso del potenziale di riscaldamento globale (GWP), pari a 675, e quindi inferiore alla soglia di 750 [57].

Tutti i dati riportati nell’analisi di inventario del ciclo di vita sono stati correlati all’energia termica necessaria per il riscaldamento e il raffrescamento durante l’intera vita operativa dell’impianto pilota (25 anni) pari a 400.975 kWh. Per l’impianto pilota sperimentale – ubicato nel C.R. Enea-Casaccia (Roma) – è stata assunta una temperatura di progetto pari a 0°C, 1415 gradi giorno (zona climatica D) e dieci ore di funzionamento (dal 1° novembre al 15 aprile). L’utenza simulata da asservire sarà un locale ad uso ufficio,

di superficie pari a 140 m<sup>2</sup> e altezza di 2,7 m. In particolare, le ore di riscaldamento all'anno saranno 1130, mentre 760 quelle di raffrescamento.

#### 4.4 Risultati ed interpretazione dei dati

L'elaborazione dei dati è stata condotta utilizzando il codice commerciale SimaPro 9.0, sviluppato dalla società olandese PRE (Product Ecology Consultant) per conto del ministero dell'ambiente olandese. Il software, tra i più utilizzati al mondo, consente di ottenere dati riguardanti la sostenibilità ambientale e di valutare le prestazioni ambientali di prodotti e servizi e può essere usato per differenti applicazioni, come l'analisi del ciclo di vita del prodotto, la carbon e water footprint, il design di prodotti, per dichiarazioni ambientali di prodotto e molto altro. Il codice, oltre alla ricca banca dati, presenta molteplici metodi di valutazione degli impatti e permette l'analisi iterativa dei risultati, consentendo un facile e rapido confronto tra i diversi processi esaminati. Il programma è in grado di gestire processi estremamente complessi in modo efficiente e flessibile, integrandosi perfettamente con il complesso set di database e metodi di valutazione che affollano il mondo dell'analisi del ciclo di vita.

Il codice presenta all'interno dell'inventario un vasto set di processi di default, organizzati per classi e sottoclassi, secondo uno schema che comprende:

- materials;
- energy,
- transport;
- processing;
- use;
- waste scenario;
- waste treatment.

Una volta inseriti i dati di input e output del processo, e il fine vita dei materiali (dati di inventario), si procede con la selezione del metodo di valutazione. Il software elabora i dati e li restituisce secondo due modalità:

- in forma tabulare;
- diagrammi a barre (istogrammi).

I valori positivi rappresentano l'entità del danno, mentre quelli negativi esprimono un danno evitato.

L'utilizzo del software SimaPro ha evidenziato che la fase più impattante per i due sistemi è la fase di esercizio, a causa del consumo di energia elettrica a bassa tensione (IT) leggermente maggiore per il sistema ASHP rispetto al sistema GSHP. A prima vista sembrerebbe che il sistema GSHP abbia un impatto complessivo maggiore (Figura 3), ma sono necessarie alcune considerazioni. Sicuramente le perforazioni, l'installazione delle sonde e del casing dei fori è la fase di maggior impatto di un sistema GSHP, ma ha la particolarità di essere funzionale a più cicli operativi. Inoltre, la vita utile del sistema geotermico, esclusa la pompa di calore geotermica, può raggiungere i 100 anni. Pertanto, mentre gli impatti derivanti dalla sua produzione e realizzazione sono collocati in un periodo di tempo limitato, i benefici economici e ambientali potrebbero coprire 3 o 4 cicli di vita delle pompe di calore. Pertanto, se l'analisi si estendesse su un periodo di tempo più lungo, i benefici ambientali sarebbero più evidenti. Il sistema GSHP esaminato offre una riduzione di circa il 10% del consumo di energia per il riscaldamento e del 22% per il raffreddamento. Chiaramente l'impianto sperimentale, concepito per scopi di ricerca scientifica, non mostra una così spiccata convenienza rispetto a un sistema ASHP. Ciò è dovuto al fatto che il clima alle nostre latitudini è mite, diversamente se considerato nel regime estivo.

Pertanto, dalla valutazione degli impatti per ciascuna fase, è possibile affermare che il sistema GSHP presentato ha un impatto ambientale complessivamente inferiore rispetto al sistema ASHP durante la sua vita (Figura 3).

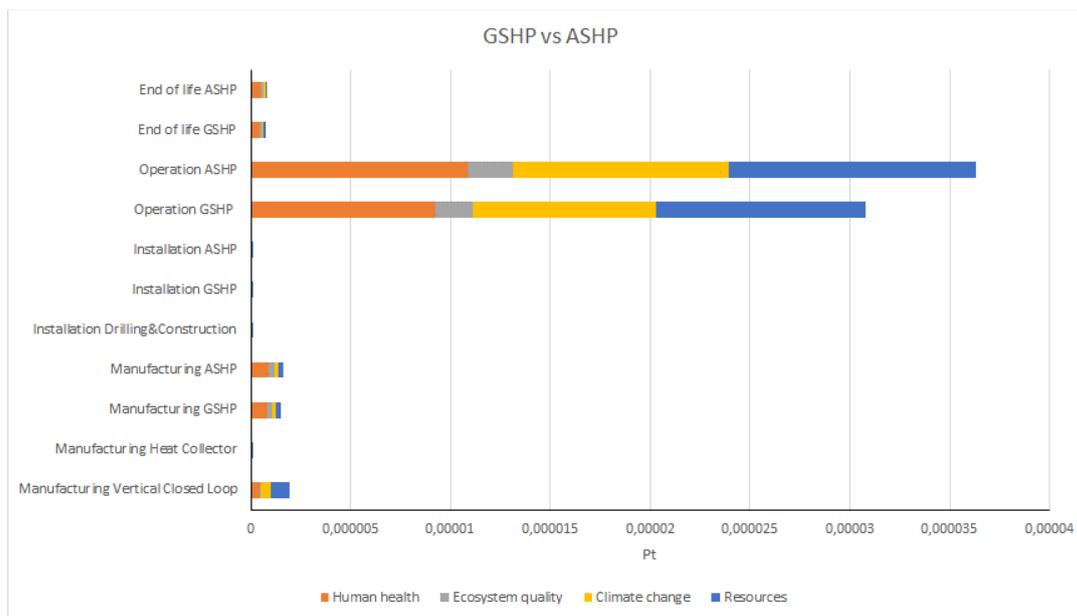


Figura 3. Impatto sulle quattro categorie di danno riferire a ciascuna fase dei due sistemi confrontati

## 5 Conclusioni

In questo report sono state descritte le principali caratteristiche di ALMABuild, un toolbox realizzato in ambiente Matlab/Simulink per la modellazione energetica dinamica di edifici. Per mezzo di ALMABuild e del software di simulazione dinamica commerciale TRNSYS 17, sono state analizzate diverse configurazioni impiantistiche basate su una pompa di calore, per le quali sono state effettuate simulazioni numeriche che hanno permesso di ricavare i parametri che ottimizzano le prestazioni stagionali dei vari sistemi.

Contrariamente agli altri applicativi Simulink che possono essere trovati in letteratura, ALMABuild è costituito sia da una libreria standard del software che da un insieme di interfacce grafiche che guidano l'utente per l'inserimento dei dati (Graphical User Interface, GUI).

La modellazione di edifici in ALMABuild si basa su un approccio a parametri concentrati, che consiste nella descrizione di un edificio mediante la modellazione di tutti gli elementi che compongono il suo involucro edilizio.

La libreria ALMABuild è composta da una serie di blocchi utilizzati per la modellazione degli elementi massivi dell'involucro (pareti, tetti e solai), degli elementi trasparenti (finestre) e per la risoluzione delle equazioni di bilancio termico delle singole zone termiche; all'interno del toolbox sono stati implementati diversi modelli di calcolo, di complessità crescente, descritti brevemente all'interno di questo report.

La principale novità introdotta da ALMABuild è rappresentata dal suo approccio alla modellazione dinamica degli edifici: l'utente è guidato nell'inserimento dei dati dalle GUI, che richiamano una serie di m-file in maniera automatica. Mediante questi m-file, basati sui dati definiti dall'utente, la modello di un edificio viene implementato automaticamente all'interno del foglio di lavoro Simulink, importando tutti i blocchi necessari dalla libreria di ALMABuild, collegandoli correttamente ed impostando tutti i parametri necessari. In questo modo, il principale svantaggio che limita la diffusione degli strumenti Simulink, legato alla scarsa conoscenza del software ed alla difficoltà nella realizzazione di un modello complesso, è superato.

Sono poi stati analizzati attraverso simulazioni dinamiche le prestazioni di diverse tipologie di impianti a pompa di calore. In particolare, è stato studiato:

- il comportamento stagionale di pompe di calore “dual-source” in grado di sfruttare due diversi serbatoi termici esterni (aria e terreno),
- le prestazioni di impianti a pompa di calore abbinati a campi fotovoltaici

- l'utilizzo dell'inerzia termica dell'edificio per la regolazione ottimale di impianti a pompa di calore
- le performance di sistemi ibridi caldaia/pompa di calore.

I risultati delle simulazioni dinamiche effettuate hanno evidenziato che le pompe di calore dual-source aria-terreno possono essere la soluzione ottimali nel caso di edifici con problemi di sostenibilità di lungo termine della temperatura del terreno, causati da carichi sbilanciati o da un sottodimensionamento del campo sonde. La temperatura di switch ottimale (temperatura dell'aria esterna sotto la quale viene scambiato calore col terreno e sopra la quale viene sfruttata invece l'aria) risulta inferiore nel caso di una minore lunghezza totale del campo. È possibile ridurre la lunghezza totale del campo sonde fino al 50% in presenza di carichi sbilanciati dell'edificio, garantendo prestazioni annuali maggiori del 10-20% rispetto ad una pompa di calore ad aria, con il duplice vantaggio, rispetto ad una pompa di calore geotermica, di ridurre la deriva della temperatura del terreno e di abbassare il costo d'impianto.

Nel caso di pompa di calore abbinata ad un campo fotovoltaico, tutti i casi analizzati hanno mostrato un elevato aumento delle prestazioni energetiche stagionali della pompa di calore rispetto al caso in assenza di pannelli fotovoltaici. L'incremento di *SEER* durante la stagione estiva può arrivare fino ad un fattore 15. Le simulazioni effettuate hanno confermato la potenzialità dell'accoppiamento di una pompa di calore con un campo fotovoltaico ed un sistema di accumulo, elettrico o termico. Durante la stagione estiva si ottengono i miglioramenti più significativi: la produzione di energia elettrica e la richiesta di energia frigorifera sono contemporanee ed è possibile quasi annullare i consumi effettivi della pompa di calore.

È stato dimostrato come sia possibile, nel caso di emettitori radianti, installare una pompa di calore sottodimensionata, abbinata ad una resistenza elettrica di back-up, sfruttando la capacità degli elementi massivi dell'involucro edilizio di accumulare energia termica quando la temperatura dell'aria esterna risulta maggiore della temperatura bivalente del sistema. L'energia termica immagazzinata può quindi essere utilizzata quando la temperatura esterna scende al di sotto della temperatura bivalente, migliorando le condizioni di comfort termico interno e riducendo il fabbisogno energetico complessivo dell'impianto durante la stagione di riscaldamento.

L'adozione di un sistema ibrido (pompa di calore abbinata a caldaia a gas/resistenza elettrica) con funzionamento puramente parallelo (temperatura di cut-off pari alla temperatura esterna di progetto) ha mostrato significativi risparmi energetici rispetto al funzionamento alternativo (temperatura di cut-off pari alla temperatura bivalente) e soprattutto rispetto ad una soluzione tradizionale basata su un singolo generatore di calore (pompa di calore o caldaia a condensazione). Il dimensionamento ottimale della pompa di calore prevede che questa copra circa la metà del carico di progetto dell'edificio. Con pompe di calore eccessivamente sottodimensionate, l'efficienza del sistema ibrido si riduce, poiché una parte consistente del fabbisogno energetico dell'edificio viene soddisfatta dal sistema di back-up, con bassa efficienza energetica.

Infine, le pompe di calore polivalenti si sono rivelate soluzioni promettenti per ridurre i consumi energetici degli edifici durante la stagione estiva grazie alla modalità di funzionamento in recupero totale, che permette di produrre acqua calda sanitaria "gratuitamente" sfruttando il calore scaricato al condensatore della pompa di calore. I risultati delle simulazioni numeriche hanno evidenziato come le prestazioni del sistema possano essere ottimizzate estendendo il tempo di utilizzo della pompa di calore in questa modalità operativa, agendo sul sistema di controllo dell'impianto in base alla modalità operativa della macchina.

Per quanto riguarda l'analisi LCA, lo studio svolto ha valutato e confrontato i cicli di vita e i conseguenti impatti ambientali di due opzioni di condizionamento ambientale: pompa di calore geotermica (GSHP) e sistema di condizionamento tradizionale ad aria (ASHP). I risultati di questo studio possono interessare chi opera nel campo della progettazione e della scelta di soluzioni impiantistiche per edifici a basso impatto in termini di emissioni di CO<sub>2</sub>. Oggetto dell'analisi LCA è stato un impianto geotermico pilota accoppiato a una pompa di calore acqua-acqua che sarà realizzato presso il C.R. ENEA-Casaccia (Roma), insieme a un sistema tradizionale a pompa di calore ad aria. In particolare, il sistema GSHP è un impianto geotermico a circuito chiuso, costituito da quattro pozzi a differenti profondità (100 m, 35 m, 50 m e 80 m) attrezzati con sonde

geotermiche double U di diametro 32 mm, con layout verticale per ogni pozzo. Il numero di pozzi e la loro profondità sono stati dimensionati in funzione dei carichi termici di punta richiesti dall'utenza simulata sia in riscaldamento che in raffrescamento. Rispetto a un sistema tradizionale, nel GSHP viene sfruttata una risorsa termica che rimane fissa e costante durante tutto l'anno. Ciò si traduce in una maggiore efficienza del sistema e in un minor consumo di energia da parte della pompa di calore. Lo studio LCA, secondo gli standard ISO, è stato condotto su ogni fase del ciclo di vita delle due soluzioni tecnologiche. Tutti i dati riportati nell'analisi dell'inventario del ciclo di vita sono stati correlati alla potenza termica richiesta per il riscaldamento e il raffrescamento durante l'intera vita operativa (25 anni).

Il sistema GSHP, durante la fase di produzione, ha un impatto significativo rispetto agli altri componenti del sistema ASHP. Al contrario, gli impatti leggermente maggiori del sistema ASHP si registrano durante la fase di esercizio. È da considerare che l'attività di scavo e il circuito delle sonde geotermiche hanno una vita utile di 100 anni, il che consente molteplici cicli di vita operativa dell'impianto geotermico. Chiaramente, se l'analisi fosse estesa ad un periodo di tempo più lungo e a un diverso contesto climatico, i benefici economico-ambientali derivanti dall'adozione del GSHP per unità di energia aumenterebbero.

Pertanto, si può concludere che il sistema GSHP, nel complesso, è più efficiente dal punto di vista energetico e ha un minore impatto ambientale a lungo termine rispetto a un sistema tradizionale di condizionamento ad aria. Inoltre, una maggiore efficienza sarebbe possibile con un sistema ibrido geotermico-fotovoltaico, in quanto l'apporto elettrico richiesto dal compressore della pompa di calore geotermica sarebbe soddisfatto dalla produzione di energia elettrica prodotta dall'impianto fotovoltaico.

## 6 Riferimenti bibliografici

1. M Magni, JP Campana, F Ochs, GL Morini, Numerical investigation of the influence of heat emitters on the local thermal comfort in a room, *Building Simulation*, Vol. 12(3), 395-410 (2019).
2. JP Campana, GL Morini, BESTEST and EN ISO 52016 Benchmarking of ALMABuild, a New Open-Source Simulink Tool for Dynamic Energy Modelling of Buildings, *Energies*, 12, 2938 (2019) doi:10.3390/en12152938.
3. JP Campana, M Schuss, A Mahdavi and GL Morini, Effects of the room temperature sensor position and radiator sizing on indoor thermal comfort and energy performances, *Proc. of 13th REHVA World Congress CLIMA 2019*, 111, 01006, 26-29 May, Bucarest (Romania) (2019) doi.org/10.1051/e3sconf/201911101006.
4. JP Campana, M Schuss, A Mahdavi and GL Morini, A Simplified Zonal Model for The Evaluation of the Spatial Distribution of Air Temperature in Indoor Environments, *Proc. of Building Simulation 2019: 16° IBPSA International Conference and Exhibition BS2019, 2-4 September, Roma (Italy) (2019) (ISBN: 978-1-7750520-1-2) anche in Proceedings of the International Building Performance Simulation Association, vol. 16 (ISSN: 2522-2708).*
5. JP Campana and GL Morini, Numerical Analysis of the Sensitivity to the Occupant Window Opening of the Yearly Energy Consumptions and of the Indoor Thermal Comfort Conditions in a Series of Reference Cases, *Proc. of Building Simulation 2019: 16° IBPSA International Conference and Exhibition BS2019, 2-4 September, Roma (Italy) (2019) (ISBN: 978-1-7750520-1-2) anche in Proceedings of the International Building Performance Simulation Association, vol. 16 (ISSN: 2522-2708).*
6. JP Campana and GL Morini, Sensitivity analysis of energy demand and indoor comfort to the occupant behaviour in a single-zone office, *Proc. of 51° International Conference AICARR: The Human dimension of building energy performance, 20-22 February, Venice (Italy) (2019).*
7. JP Campana and GL Morini, The ALMABuild benchmark: a new Simulink open blockset for building energy modelling., *Proc. of XXXVII UIT National Conference, vol. 1, June 24-26, Padova (2019).*
8. JP Campana and GL Morini, ALMABuild as a Design Tool for the Analysis of the Effect of the Occupant Behaviour on the Energy Building Consumptions, *Proc. 74 Conference of Italian Thermal Machines Engineering Association, ATI2019, Sept. 11-13, Modena (Italy) (2019).*

9. CEN. EN ISO 13370: Thermal performance of buildings - Heat transfer via the ground - Calculation methods. Bruxelles (2017).
10. J. Crabb, N. Murdoch and J. Penman, A simplified thermal response model, *Building Services Engineering Research and Technology*, 8.1, 13-19 (1987).
11. A. Tindale, Third-order-lumped-parameter simulation method, *Building Services Engineering Research and Technology*, 14.3, 87-97 (1993).
12. TR Nielsen, Simple tool to evaluate energy demand and indoor environment in the early stages of building design, *Solar Energy*, 78, 73-83 (2005).
13. CEN. EN ISO 13790: Energy performance of buildings – Calculation of energy use for space heating and cooling. Bruxelles (2008).
14. F. Lorenz and G. Masy, Méthode d'évaluation de l'économie d'énergie apportée par l'intermittence de chauffage dans les bâtiments, Traitement par différences finies d'un modèle à deux constantes de temps, *Faculté de Sciences Appliquées, Université de Liège, Belgium* (in French) (1982).
15. M. Gouda, S. Danaher and C. Underwood, Building thermal model reduction using nonlinear constrained optimization, *Building and Environment*, 37, 1255-1265 (2002).
16. TA Mara, F. Garde, H. Boyer and M. Mamode, Empirical validation of the thermal model of a passive solar cell test, *Energy and Buildings*, 33, 598-599 (2001).
17. G. Fraisse, C. Viardot, O. Lafabrie and G. Achard, Development of a simplified and accurate building model based on electrical analogy, *Energy and Buildings*, 34, 1017-1031 (2002).
18. C. Underwood, An improved lumped parameter method for building thermal modelling, *Energy and Buildings*, 79, 191-201 (2014).
19. CEN. EN ISO 52016-1: Energy performance of buildings – Energy needs for heating and cooling, internal temperatures and sensible and latent heat loads. Part 1: Calculation procedure. Bruxelles (2017).
20. CEN. EN ISO 6946: Building components and building elements. Thermal resistance and thermal transmittance. Calculation methods. Bruxelles (2017).
21. UNI. UNI TS 11300-1: Energy performance of buildings-Part 1: Evaluation of energy needs for space heating and cooling. Milano (2014).
22. SM Elsherbiny, G. Raithby and K. Hollands, Heat transfer by natural convection across vertical and inclined air layers, *Journal of Heat Transfer*, 104.1, 96-102 (1982).
23. M. Dongellini, C. Naldi, G.L. Morini, Seasonal performance evaluation of electric air-to-water heat pump systems, *Applied Thermal Engineering* 90 (2015) 1072-1081.
24. V. Bianco, F. Scarpa, L.A. Tagliafico, Estimation of primary energy savings by using heat pumps for heating purposes in the residential sector, *Applied Thermal Engineering* 114 (2017) 938-947.
25. M. Dongellini, C. Naldi, G.L. Morini, Sizing effects on the energy performance of reversible air-source heat pumps for office buildings, *Applied Thermal Engineering* 114 (2017) 1073-1081.
26. F. Wang, C. Liang, X. Zhang, Research of anti-frosting technology in refrigeration and air conditioning fields: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 81 (2018) 707-722.
27. P. Vocale, G.L. Morini, M. Spiga, Influence of outdoor air conditions on the air source heat pumps performance, *Energy Procedia* 45 (2014) 653-662.
28. J.F. Urchueguía, M. Zaccarès, J.M. Corberán, Á. Montero, J. Martos, H. Witte, Comparison between the energy performance of a ground coupled water to water heat pump system and an air to water heat pump system for heating and cooling in typical conditions of the European Mediterranean coast, *Energy Conversion and Management* 49 (2008) 2917-2923.
29. R. Dott, M. Haller, J. Ruschenburg, F. Ochs, J. Bony, IEA-SHC Task 44 Subtask C Technical Report: The Reference Framework for System Simulations of the IEA SHC Task 44 / HPP Annex 38: Part B: Buildings and Space Heat Load, IEA-SHC, 2013.
30. METEONORM, Global Meteorological Database for Solar Energy and Applied Climatology, Version 5, (<http://www.meteotest.com>).
31. VDI. VDI-Richtlinien 4640 Blatt 2, Thermische Nutzung des Untergrundes - Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen (Thermal use of the underground - Ground source heat pump systems), 2009.

32. M. Dongellini, M. Abbenante, G.L. Morini, A strategy for the optimal control logic of heat pump systems: impact on the energy consumptions of a residential building, in Proceedings of 12th IEA Heat Pump Conference 2017, Rotterdam, The Netherlands, 2017.
33. H. Wolisz, T. Schutz, T. Blanke, M. Hagenkamp, M. Kohn, M. Wesseling and D. Muller, Cost optimal sizing of smart buildings' energy system components considering changing end-consumer electricity markets, *Energy* 137, 715-728 (2017).
34. I. Grossi, M. Dongellini, A. Piazzini and G.L. Morini, Dynamic modelling and energy performance analysis of an innovative dual-source heat pump system, *Applied Thermal Engineering* 142, 745-759 (2018).
35. Arera (Autorità di Regolazione per Energia Reti e Ambiente), Condizioni economiche per i clienti del mercato tutelato (Online, <https://www.arera.it/it/dati/condec.htm>) (2021).
36. European Union, Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the Energy Performance of Buildings, European Union, Brussels, Belgium, 2010.
37. European Union, Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the Council of 25 October 2012 on Energy Efficiency, amending Directives 2009/125/EC, European Union, Brussels, Belgium, 2012.
38. European Union, Directive 2018/844 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 2010/31/EU on the Energy Performance of Buildings and Directive 2012/27/EU on Energy Efficiency, Brussels, Belgium, 2018.
39. D.F. Dominkovic, P. Giannou, M. Münster, A. Heller and C. Rode, Utilizing thermal building mass for storage in district heating systems: Combined building level simulations and system level optimization. *Energy* 153, 949–966 (2018).
40. M. Liu and P. Heiselberg, Energy flexibility of a nearly zero-energy building with weather predictive control on a convective building energy system and evaluated with different metrics, *Applied Energy* 233, 764-775 (2019).
41. T. Kitzberger, D. Kilian, J. Kotik and T. Proll, Comprehensive analysis of the performance and intrinsic energy losses of centralized Domestic Hot Water (DHW) systems in commercial (educational) buildings, *Energy and Buildings* 195, 126-138 (2019).
42. A. Bertrand, A. Mastrucci, N. Schuler, R. Aggoune and F. Maréchal, Characterisation of domestic hot water end-uses for integrated urban thermal energy assessment and optimization, *Applied Energy* 186, 152-166 (2017).
43. M. Dongellini, L. Belmonte and G.L. Morini, Dynamic modelling and control system optimization of a reversible air-to-water heat pump with heat recovery for domestic hot water production, *Building Simulation Applications*, vol. 2020, 37-45 (2020).
44. Violante A.C., Boccardi G., Falconi L.M., Lattanzi A., Menale C., Morlacca M., Simonetti L., Proposito M., Trinchieri R. "Studio preliminare di applicabilità di sorgente geotermica a bassa entalpia ad un caso studio con pompa di calore", Report Ricerca di sistema, Piano Triennale 2019-2021/n.026;
45. SETAC. "A Conceptual Framework for Life Cycle Assessment" (1993), workshop record Sandestin, Florida;
46. Tintinelli A. "Enciclopedia degli idrocarburi-ENI-Istituto della Enciclopedia italiana Fondata da Giovanni Treccani, 2007, capitolo 7, pag. 633-641;
47. SETAC - Guidelines for life-cycle assessment. A "code of practice": workshop held at Sesimbra, Portugal, (1993);
48. UNI EN ISO 14040:2006: Gestione ambientale - Valutazione del ciclo di vita - Principi e quadro di riferimento
49. UNI EN ISO 14040:1998 Gestione ambientale - Valutazione del ciclo di vita - Principi e quadro di riferimento;
50. Daddi, T., Nucci, B., Iraldo, F., Testa, F. "Enhancing the adoption of life cycle assessment by small and medium enterprises grouped in an industrial cluster: a case study of the tanning cluster in Tuscany (Italy). (2015) *J. Ind. Ecol.* 20 (5),1199e1211, <http://dx.doi.org/10.1111/jiec.12379> published online;
51. UNI EN ISO 14041 - Gestione ambientale. Valutazione del ciclo di vita. Definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione e analisi dell'inventario (1999);

52. BS EN ISO 14042:2000 – “Environmental management. Life cycle management. Life cycle impact assessment”;
53. BS EN ISO 14043:2000 – “Environmental management. Life cycle assessment. Life cycle interpretation;
54. Neri P. “Verso la valutazione ambientale degli edifici” Life Cycle Assessment a supporto della progettazione eco-sostenibile, Alinea, Firenze, 2007;
55. Neri P. et alii “L’analisi ambientale della gestione dei rifiuti con il metodo LCA” CNR Area Ricerca Bologna, 2009;
56. Neri P. et alii “L’analisi ambientale dei prodotti agroalimentari con il Metodo del Life Cycle Assessment” ARPA Sicilia, 2010;
57. ISO 817:2014 “Refrigerants- Designation and safety classification” .

## 7 Appendice A: Bus di connessione tra blocchi in ALMABuild

In questa appendice vengono descritti tutti e sette i segnali bus adottati in ALMABuild per il trasferimento di informazioni tra blocchi diversi. Tutte le variabili che compongono ciascun bus sono definite insieme con il loro significato fisico e la loro unità di misura.

Il primo segnale del bus è il Weather Data Bus, creato nel blocco Weather Data e contiene le informazioni principali relative ai dati climatici utilizzati per la caratterizzazione delle condizioni ambientali. Le variabili che compongono questo bus sono elencate e descritte nella Tabella A-1. Il Weather Data Bus può essere richiamato in ambiente Simulink mediante un blocco Goto.

**Tabella A-1. Componenti del Weather Data Bus.**

Nome	Descrizione	Unità di misura
<i>Te</i>	Temperatura dell'aria esterna	°C
<i>Hbh</i>	Irraggiamento diretto su piano orizzontale	W/m <sup>2</sup>
<i>Hdh</i>	Irraggiamento totale su piano orizzontale	W/m <sup>2</sup>
<i>Pvap</i>	Pressione parziale di vapore dell'aria esterna	Pa
<i>Tsky</i>	Temperatura del cielo	°C
<i>H.R.</i>	Umidità relativa dell'aria esterna	%
<i>Wind</i>	Velocità media del vento	m/s
<i>Tmonth</i>	Temperatura media mensile dell'aria esterna	°C

La descrizione della posizione del sole nel cielo ed altre informazioni relative al sole necessarie per la valutazione delle condizioni climatiche esterna, come ora dell'alba e del tramonto, sono raccolte nel Sun Bus creato nel blocco relativo ai dati solari. Questo bus, i cui componenti sono riportati in Tabella A-2, viene utilizzato per la valutazione delle componenti della radiazione solare incidente su una superficie. Per quanto riguarda il Weather Data Bus, il Sun Bus viene richiamato per mezzo di un altro blocco Goto, indicato come Sun.

**Tabella A-2. Componenti del Sun Bus.**

Nome	Descrizione	Unità di misura
<i>Solar azimuth</i>	Angolo di azimuth del Sole che ne definisce la direzione in cielo	Rad
<i>Solar elevation</i>	Angolo che definisce l'altezza del Sole in cielo	Rad
<i>F1</i>	Coefficiente F <sub>1</sub> del modello di Perez	-
<i>F2</i>	Coefficiente F <sub>2</sub> del modello di Perez	-
<i>Omega</i>	Angolo solare orario	Rad
<i>Day-night</i>	Definisce il giorno e la notte: è uguale a 1 dall'alba astronomica al tramonto, altrimenti è a uguale a 0	-
<i>Omega_s</i>	Angolo solare dell'alba	Rad
<i>Solar declination</i>	Angolo che definisce la posizione del Sole sulla sfera celeste nel sistema di riferimento dell'equatore	Rad

Basato sia sul Weather Data Bus che sul Sun Bus, il Solar Radiation Bus viene creato in blocchi dedicati. Questo bus è composto dalle tre componenti della radiazione solare istantanea incidente su una data esposizione, indicate come radiazione diretta, diffusa e riflessa ed espresse in W/m<sup>2</sup>.

Il quarto segnale bus analizzato è il Temperature Zone Bus, che rappresenta il principale output del blocco che calcola il bilancio termico dell'edificio e contiene le informazioni su temperatura convettiva e radiante della zona termica, espresse in °C:

- T<sub>a</sub>, ovvero la temperatura media dell'aria della zona termica;
- T<sub>rad</sub>, ovvero la temperatura media radiante della zona termica.

Anche il Temperature Zone Bus viene richiamato nel foglio di lavoro di Simulink da un blocco Goto, identificato come  $T_{\text{nome della zona termica}}$ .

Il Superficial Temperature Bus, come il Temperature Zone Bus, è un output di entrambi i blocchi relativi alle componenti massive dell'involucro edilizio ed a quelle trasparenti e contiene informazioni sulla temperatura superficiale dell'elemento di involucro considerato. Ancora una volta, i componenti di questo bus sono espressi in °C:

- $T_{se}$ , rappresenta la temperatura della superficie dell'elemento dell'involucro che non è rivolta verso la zona termica considerata;
- $T_{si}$  è la temperatura della superficie interna di un elemento dell'involucro.

Il Power Bus, le cui componenti sono elencate in Tabella A-3, contiene informazioni sui diversi flussi termici che influenzano sia i singoli elementi dell'involucro edilizio che l'intera zona termica. I valori positivi delle potenze sono convenzionalmente associati ai flussi termici che entrano nella zona termica. Poiché questo bus viene utilizzato sia per gli elementi dell'involucro che per l'intera zona termica, è stata scelta una particolare convenzione: ad esempio, se la componente  $Q_{ci}$  è relativa ad un blocco utilizzato per la modellazione di una parete, essa rappresenta la potenza scambiata da quel particolare elemento dell'involucro per convezione con l'ambiente interno. Al contrario, se il Power Bus è l'output di un blocco che modella il comportamento di una intera zona termica, questo bus rappresenta la potenza totale scambiata per convezione da tutti gli elementi dell'involucro che racchiudono la zona termica.

**Tabella A-3. Componenti del Power Bus.**

Nome	Descrizione	Unità di misura
$Q_{ce}$	Potenza termica relativa allo scambio termico convettivo della superficie esterna dell'elemento dell'involucro edilizio	W
$Q_{re}$	Potenza termica relativa allo scambio termico radiativo della superficie esterna dell'elemento dell'involucro edilizio con l'ambiente circostante	W
$Q_{sky}$	Potenza termica scambiata per irraggiamento ad alta lunghezza d'onda dalla superficie esterna dell'elemento dell'involucro edilizio con il cielo	W
$Q_{sop}$	Irraggiamento solare assorbito dalla superficie esterna degli elementi opachi dell'involucro (compreso di telaio per le finestre)	W
$Q_{sw}$	Irraggiamento solare assorbito dai vetri delle finestre	W
$Q_g$	Flusso di calore dovuto allo scambio termico con il terreno	W
$Q_{ci}$	Potenza termica relativa allo scambio termico convettivo della superficie interna dell'elemento dell'involucro edilizio	W
$Q_{ri}$	Potenza termica relativa allo scambio termico radiativo della superficie interna dell'elemento dell'involucro edilizio con l'ambiente circostante	W
$Q_{sg}$	Apporti gratuiti dovuti alla radiazione solare trasmessa attraverso tutti gli elementi trasparenti della zona termica e assorbiti dagli elementi interni	W
$Q_{c,int}$	Componente convettiva degli apporti gratuiti interni alla zona termica	W
$Q_{r,int}$	Componente radiativa degli apporti gratuiti interni alla zona termica	W
$Q_{c,HVAC}$	Componente convettiva della potenza termica ceduta dall'impianto HVAC alla zona termica	W
$Q_{r,HVAC}$	Componente radiativa della potenza termica ceduta dall'impianto HVAC alla zona termica	W
$Q_{vent}$	Potenza termica scambiata dalla zona termica legata alle infiltrazioni ed a tutte le tipologie di ventilazione (naturale, meccanica, con altre zone termiche)	W

Infine, l'ultimo segnale bus analizzato è il Ventilation Bus, che raccoglie informazioni sui flussi di aria e sulla potenza termica scambiata a causa della ventilazione. Questo bus, le cui componenti sono elencate in

Tabella A-4, contiene informazioni legate sia al flusso termico che alla portata d'aria dovuto a diverse cause: infiltrazioni, ventilazione naturale o meccanica ed infine ai flussi d'aria che possono provenire da zone termiche adiacenti. Per tutte queste variabili, vengono considerati positivi i valori legati a flussi (di calore o di massa) che entrano nella zona termica considerata.

**Tabella A-4. Componenti del Ventilation Bus.**

<b>Nome</b>	<b>Descrizione</b>	<b>Unità di misura</b>
<i>Qinfiltration</i>	Dispersioni legate alle infiltrazioni	W
<i>Qnatural</i>	Dispersioni legate alla ventilazione naturale	W
<i>Qmechanical</i>	Dispersioni legate alla ventilazione meccanica	W
<i>Qinter</i>	Dispersioni legate ai flussi di aria da/verso le zone adiacenti	W
<i>m_infiltration</i>	Portata d'aria legate alle infiltrazioni	kg/s
<i>m_natural</i>	Portata d'aria legate alla ventilazione naturale	kg/s
<i>m_mechanical</i>	Portata d'aria legate alla ventilazione meccanica	kg/s
<i>m_inter</i>	Portata d'aria legate ai flussi da/verso le zone adiacenti.	kg/s

## 8 Appendice B: Descrizione dei blocchi della libreria ALMABuild

In questa appendice vengono descritti brevemente tutti i blocchi della libreria ALMABuild definendo, per ciascuno di essi, input, output e parametri richiesti.

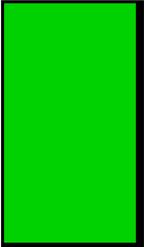
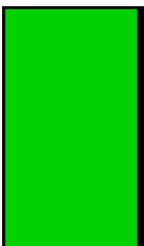
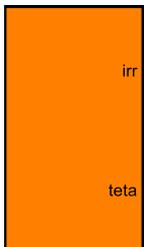
Innanzitutto, i componenti raccolti nel blockset Dati climatici, adottati per la gestione dei dati meteorologici, sono descritti in Tabella B-1.

Nella Tabella B-2 sono invece riportati i blocchi che descrivono gli elementi massivi dell'involucro, utilizzati se il bilancio termico della zona viene risolto seguendo il modello più semplice. In Tabella B-3 vengono raccolti i blocchi richiamati se viene adottato il modello radiativo. Inoltre, nella stessa tabella B-3 è possibile trovare un gran numero di blocchi che simulano elementi di intersezione fra zone termiche, come soffitti e divisori interni. All'interno del toolbox ALMABuild sono stati sviluppati blocchi specifici per accoppiare le diverse zone termiche con diversi livelli di dettaglio. Ciò significa che, mediante il corretto elemento di intersezione, una zona termica può essere simulata seguendo il modello semplice e la zona adiacente può essere descritta adottando il modello radiativo.

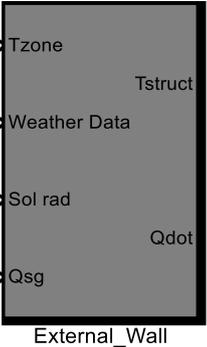
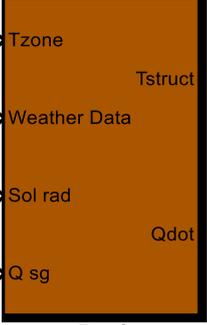
In Tabella B-4, sono descritti i blocchi Simulink relativi agli elementi attivi dell'involucro, come pavimenti o soffitti radianti.

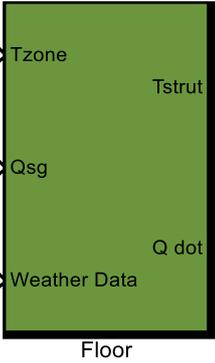
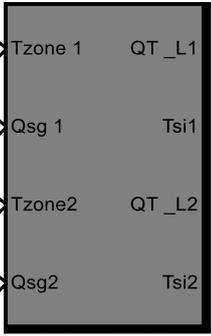
La creazione di blocchi utilizzati per la modellazione degli elementi trasparenti dell'involucro sono raccolti in Tabella B-5: tali componenti vengono utilizzati quando vengono adottati il modello semplice o quello radiativo per risolvere il bilancio termico della zona. In Tabella B-6 sono elencati tutti i blocchi necessari per valutare il bilancio termico di una zona termica disponibili nella libreria ALMABuild. Infine, blocchi aggiuntivi utilizzati per la modellazione degli edifici sono elencati e descritti nella Tabella B-7.

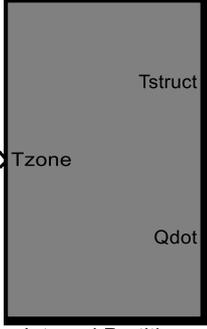
**Tabella B-1. Lista dei componenti del blockset relative ai dati climatici.**

 <p style="text-align: center;">Weather Data Reader</p>	<p><b>Input:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Climatic_Data structure defined in the workspace.</li> </ul> <p><b>Output:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Weather Data bus, that is connected to the <i>Goto</i> block tagged <i>Weather_Data</i>.</li> </ul> <p><b>Parameters:</b> none</p>
<p><b>Description:</b> this block is used for importing in SIMULINK the weather data defined in the base workspace</p>	
 <p style="text-align: center;">Solar Data</p>	<p><b>Input:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Weather Data bus, recalled by a <i>From</i> block</li> </ul> <p><b>Output:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Sun bus, connected to the <i>Goto</i> block tagged <i>Sun</i>.</li> </ul> <p><b>Parameters:</b> none</p>
<p><b>Description:</b> this block is used for the evaluation of the parameters related to the sun position in the sky.</p>	
 <p style="text-align: center;">Solar Radiation Calculator</p>	<p><b>Input:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Weather Data bus;</li> <li>Sun bus.</li> </ul> <p><b>Output:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Solar radiation bus;</li> <li>Angle of incidence of the beam solar radiation.</li> </ul> <p><b>Parameters:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Latitude;</li> <li>Slope of the surface;</li> <li>Exposition of the surface;</li> <li>Albedo.</li> </ul>
<p><b>Description:</b> this block is used for the evaluation of the angle of incidence (teta) and beam, diffuse and reflected fractions of the incident solar radiation of a surface.</p>	
 <p style="text-align: center;">Solar Radiation Reader</p>	<p><b>Input:</b> none</p> <p><b>Output:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Solar radiation bus;</li> <li>Angle of incidence of the beam solar radiation.</li> </ul> <p><b>Parameters:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Beam, diffuse and reflected solar radiation over the surface;</li> <li>Angle of incidence of beam solar radiation.</li> </ul>
<p><b>Description:</b> this block recalls data about the incident solar radiation on a surface and the angle of incidence, collected in the <i>Ambient_Data</i> structure.</p>	

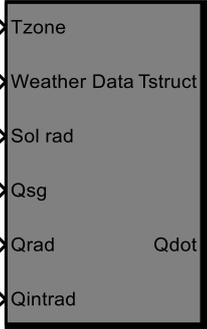
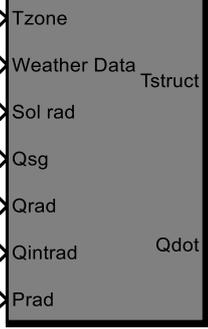
**Tabella B-2. Elenco dei blocchi sviluppati per la modellazione degli elementi massivi dell'involucro edilizio quando il bilancio termico è risolto con il modello semplice.**

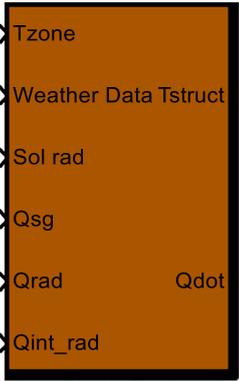
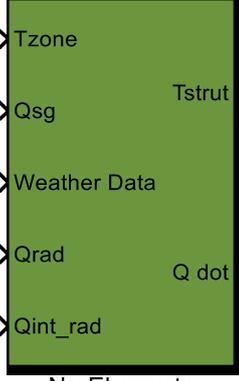
	<p><b>Input:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperature zone bus;</li> <li>• Weather Data bus;</li> <li>• Solar radiation bus, accounting the incident radiation on external surface;</li> <li>• Internal Solar gains.</li> </ul> <p><b>Output:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Superficial temperature bus;</li> <li>• Power bus of the building element.</li> </ul>
<p><b>Description:</b> in this block the 3R4C network is implemented for simulating the dynamic behaviour of external walls.</p> <p><b>Parameters:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Wall stratigraphy (thickness, thermal conductivity, density and thermal capacity of each layer);</li> <li>• Surface properties (area, outdoor and indoor solar absorbance and infrared emissivity).</li> </ul>	<p><b>Input:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperature zone bus;</li> <li>• Weather Data bus;</li> <li>• Solar radiation bus for the surface;</li> <li>• Internal solar gains.</li> </ul> <p><b>Output:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Superficial temperature bus;</li> <li>• Power bus of the building element.</li> </ul>
	<p><b>Input:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperature zone bus;</li> <li>• Weather Data bus;</li> <li>• Solar radiation bus for the surface;</li> <li>• Internal solar gains.</li> </ul> <p><b>Output:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Superficial temperature bus;</li> <li>• Power bus of the building element.</li> </ul>
<p><b>Description:</b> in this block the 3R4C network is implemented for simulating the dynamic behaviour of roof or non-vertical external massive elements.</p> <p><b>Parameters:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Element stratigraphy (thickness, thermal conductivity, density and thermal capacity of each layer);</li> <li>• Surface properties (area, outdoor and indoor solar absorbance and infrared emissivity);</li> <li>• Slope of the roof.</li> </ul>	<p><b>Input:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperature zone bus;</li> <li>• Weather Data bus;</li> <li>• Solar radiation bus for the surface;</li> <li>• Internal solar gains.</li> </ul> <p><b>Output:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Superficial temperature bus;</li> <li>• Power bus of the building element.</li> </ul>

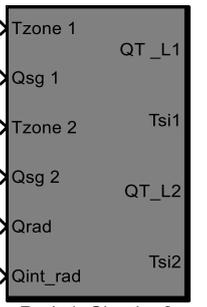
	<p><b>Input:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperature zone bus;</li> <li>• Solar gains;</li> <li>• Weather Data bus.</li> </ul>
<p><b>Description:</b> this block is used for simulating the dynamic behaviour of a slab-on-grade floor.</p> <p><b>Parameters:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Floor stratigraphy (thickness, thermal conductivity, density and thermal capacity of each layer);</li> <li>• Ground data (as required by EN ISO 13370);</li> <li>• Floor data (exposed perimeter and other data required by EN 13370);</li> <li>• Surface properties.</li> </ul>	<p><b>Output:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Superficial temperature bus;</li> <li>• Power bus of the building element.</li> </ul>
	<p><b>Input:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperature zone bus of zone 1;</li> <li>• Solar gains from zone 1;</li> <li>• Temperature zone bus of zone 2;</li> <li>• Solar gains from zone 2.</li> </ul>
<p><b>Description:</b> this block is used for the simulation of a wall that separates two adjacent thermal zones (1 and 2).</p> <p><b>Parameters:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Wall stratigraphy (thickness, thermal conductivity, density and thermal capacity of each layer);</li> <li>• Surface properties (area, solar absorbance and infrared emissivity of each side of the wall).</li> </ul>	<p><b>Output:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Power bus to zone 1;</li> <li>• Temperature of the surface facing zone 1;</li> <li>• Power bus to zone 2;</li> <li>• Temperature of the surface facing zone 2.</li> </ul>

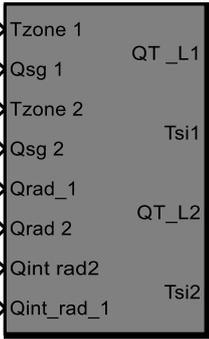
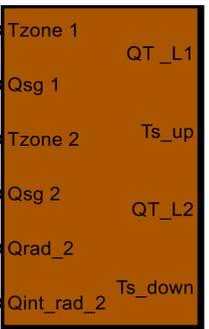
	<p><b>Input:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperature zone bus of the upper zone (labelled 1);</li> <li>• Solar gains from the upper zone (labelled 1);</li> <li>• Temperature zone bus of the lower zone (labelled 2);</li> <li>• Solar gains from the lower zone (labelled 2).</li> </ul>
<p><b>Description:</b> this block is used for simulating the behaviour of a ceiling. The required stratigraphy has to be defined from the lower to the upper zone;</p> <p><b>Parameters:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ceiling stratigraphy (thickness, thermal conductivity, density and thermal capacity of each layer);</li> <li>• Surface properties (area, solar absorbance and infrared emissivity).</li> </ul>	<p><b>Output:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Power bus to zone 1;</li> <li>• Temperature of the surface facing the upper zone;</li> <li>• Power bus to the lower zone;</li> <li>• Temperature of the surface facing the lower zone 2.</li> </ul>
	<p><b>Input:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperature zone bus of the zone in which the wall is contained.</li> </ul>
<p><b>Description:</b> this block is used for simulating an internal partition, i.e. a wall all contained within the thermal zone.</p> <p><b>Parameters:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Wall stratigraphy (thickness, thermal conductivity, density and thermal capacity of each layer);</li> <li>• Area and infrared emissivity.</li> </ul>	<p><b>Output:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Superficial temperature bus;</li> <li>• Power bus of the building element.</li> </ul>

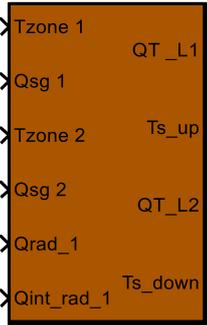
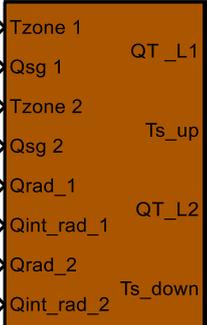
**Tabella B-3. Elenco dei blocchi sviluppati per la modellazione degli elementi massivi dell’involucro edilizio quando il bilancio termico è risolto con il modello radiativo.**

 <p style="text-align: center;">No Element</p>	<p><b>Input:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperature zone bus;</li> <li>• Weather Data bus;</li> <li>• Solar radiation bus, accounting the incident radiation on external surface;</li> <li>• Internal Solar gains;</li> <li>• Radiative heat flux involving the internal surface of the element;</li> <li>• Radiative component of internal gains.</li> </ul> <p><b>Output:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Superficial temperature bus;</li> <li>• Power bus of the building element.</li> </ul>
<p><b>Description:</b> this block contains the radiative model of an external wall.</p> <p><b>Parameters:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Wall stratigraphy;</li> <li>• Surface properties (area, outdoor and indoor solar absorbance and infrared emissivity);</li> <li>• Total area of internal surface of the zone.</li> </ul>	
 <p style="text-align: center;">With Radiator</p>	<p><b>Input:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperature zone bus;</li> <li>• Weather Data bus;</li> <li>• Solar radiation bus, accounting the incident radiation on external surface;</li> <li>• Internal Solar gains;</li> <li>• Radiative heat flux involving the internal surface of the element;</li> <li>• Radiative component of internal gains.</li> <li>• Power released by the hot water flowing across the radiator.</li> </ul> <p><b>Output:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Superficial temperature bus of the radiator;</li> <li>• Power bus of the element.</li> </ul>
<p><b>Description:</b> this block is used for simulating an external wall in which a radiator is installed.</p> <p><b>Parameters:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Wall stratigraphy;</li> <li>• Surface properties;</li> <li>• Total area of internal surface of the zone;</li> <li>• Radiator properties.</li> </ul>	

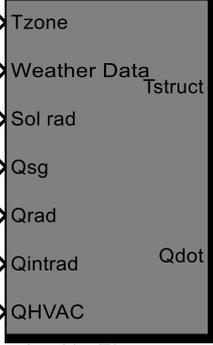
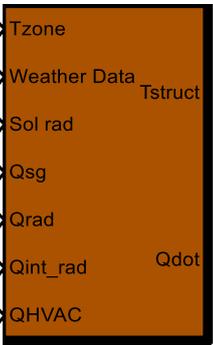
 <p style="text-align: center;">Roof Rad</p>	<p><b>Input:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperature zone bus;</li> <li>• Weather Data bus;</li> <li>• Solar radiation bus, accounting the incident radiation on external surface;</li> <li>• Internal Solar gains;</li> <li>• Radiative heat flux involving the internal surface of the element;</li> <li>• Radiative component of internal gains.</li> </ul>
<p><b>Description:</b> this block is used for the radiative modelling of roof or non-vertical external massive elements.</p> <p><b>Parameters:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Wall stratigraphy;</li> <li>• Surface properties;</li> <li>• Slope of the element;</li> <li>• Total area of internal surface of the zone.</li> </ul>	<p><b>Output:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Superficial temperature bus;</li> <li>• Power bus of the building element.</li> </ul>
 <p style="text-align: center;">No Elements</p>	<p><b>Input:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperature zone bus;</li> <li>• Internal Solar gains;</li> <li>• Weather Data bus;</li> <li>• Radiative heat flux involving the internal surface of the element;</li> <li>• Radiative component of internal gains.</li> </ul>
<p><b>Description:</b> block composed by the radiative model of a passive slab-on-grade floor.</p> <p><b>Parameters:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Floor stratigraphy;</li> <li>• Ground data (EN 13370);</li> <li>• Additional floor data (EN 13370);</li> <li>• Surface properties;</li> <li>• Total area of internal surface of the zone.</li> </ul>	<p><b>Output:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Superficial temperature bus;</li> <li>• Power bus of the building element.</li> </ul>

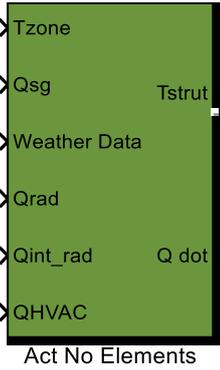
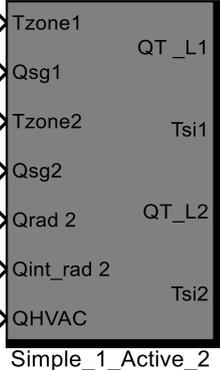
 <p>Simple_1_Rad_2</p>	<p><b>Input:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperature zone bus of zone 1;</li> <li>• Solar gains from zone 1;</li> <li>• Temperature zone bus of zone 2;</li> <li>• Solar gains from zone 2.</li> <li>• Radiative heat flux involving the internal surface of the element, facing zone 2;</li> <li>• Radiative component of internal gains of zone 2.</li> </ul>
<p><b>Description:</b> this block is used for the modelling of an internal wall that divides zone (1), described by the <i>simple model</i>, from a zone (2), in which the <i>radiative model</i> is used.</p> <p><b>Parameters:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Wall stratigraphy;</li> <li>• Surface properties (area, solar absorbance and infrared emissivity of each side of the wall).</li> <li>• Total area of internal surface of the zone 2.</li> </ul>	<p><b>Output:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Power bus to zone 1;</li> <li>• Temperature of the surface facing zone 1;</li> <li>• Power bus to zone 2;</li> <li>• Temperature of the surface facing zone 2.</li> </ul>
 <p>Rad_1_Simple_2</p>	<p><b>Input:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperature zone bus of zone 1;</li> <li>• Solar gains from zone 1;</li> <li>• Temperature zone bus of zone 2;</li> <li>• Solar gains from zone 2.</li> <li>• Radiative heat flux involving the internal surface of the element, facing zone 1;</li> <li>• Radiative component of internal gains of zone 1.</li> </ul>
<p><b>Description:</b> this block is used for the modelling of an internal wall that divides zone (1), in which the <i>radiative model</i>, is used from zone (2), described by the <i>simple model</i>.</p> <p><b>Parameters:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Wall stratigraphy;</li> <li>• Surface properties (area, solar absorbance and infrared emissivity of each side of the wall).</li> <li>• Total area of internal surface of zone 1.</li> </ul>	<p><b>Output:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Power bus to zone 1;</li> <li>• Temperature of the surface facing zone 1;</li> <li>• Power bus to zone 2;</li> <li>• Temperature of the surface facing zone 2.</li> </ul>

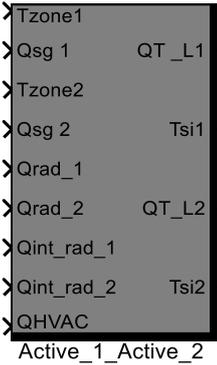
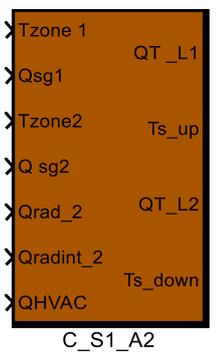
	<p><b>Input:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperature zone bus of zone 1;</li> <li>• Solar gains from zone 1;</li> <li>• Temperature zone bus of zone 2;</li> <li>• Solar gains from zone 2.</li> <li>• Radiative heat flux involving the internal wall surface (to zone 1);</li> <li>• Radiative heat flux involving the internal wall surface (to zone 2);</li> <li>• Radiative component of internal gains of zone 1.</li> <li>• Radiative component of internal gains of zone 2.</li> </ul>
<p><b>Description:</b> this block is used for the modelling of an internal wall that divides two adjacent thermal zones, both described by the <i>radiative model</i>.</p> <p><b>Parameters:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Wall stratigraphy;</li> <li>• Surface properties (area, solar absorbance and infrared emissivity of each side of the wall).</li> <li>• Total area of internal surface of both the zones.</li> </ul>	<p><b>Output:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Power bus to zone 1;</li> <li>• Temperature of the surface facing zone 1;</li> <li>• Power bus to zone 2;</li> <li>• Temperature of the surface facing zone 2.</li> </ul>
	<p><b>Input:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperature zone bus of the upper zone (labelled 1);</li> <li>• Solar gains from the upper zone (labelled 1);</li> <li>• Temperature zone bus of the lower zone (labelled 2);</li> <li>• Solar gains from the lower zone (labelled 2);</li> <li>• Radiative heat flux involving the internal surface of the element, facing zone 2;</li> <li>• Radiative component of internal gains of zone 2.</li> </ul>
<p><b>Description:</b> this block is used for modelling a ceiling that divides the upper zone (1, described by the <i>simple model</i>) to the lower zone (2, in which the <i>radiative model</i> is used).</p> <p><b>Parameters:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Wall stratigraphy;</li> <li>• Surface properties;</li> <li>• Slope of the element;</li> <li>• Total area of internal surface of the lower zone.</li> </ul>	<p><b>Output:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Power bus to zone 1;</li> <li>• Temperature of the surface facing the upper zone;</li> <li>• Power bus to the lower zone;</li> <li>• Temperature of the surface facing the lower zone 2.</li> </ul>

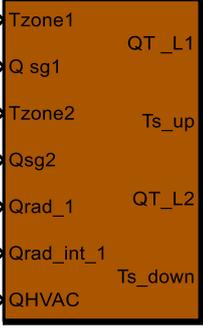
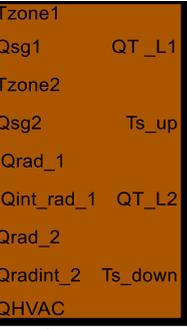
 <p>Diagram of the <b>Ceiling_Rad_1_Simple_2</b> block. It shows a vertical list of inputs on the left and corresponding output labels on the right. The inputs are: Tzone 1, Qsg 1, Tzone 2, Qsg 2, Qrad_1, and Qint_rad_1. The output labels are: QT_L1, Ts_up, QT_L2, and Ts_down.</p>	<p><b>Input:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperature zone bus of the upper zone (labelled 1);</li> <li>• Solar gains from the upper zone (labelled 1);</li> <li>• Temperature zone bus of the lower zone (labelled 2);</li> <li>• Solar gains from the lower zone (labelled 2);</li> <li>• Radiative heat flux involving the internal surface of the element, facing zone 1;</li> <li>• Radiative component of internal gains of zone 1.</li> </ul>
<p><b>Description:</b> this block is used for modelling a ceiling that divides the upper zone (1, described by the <i>radiative model</i>) from the lower zone (2, in which the <i>simple model</i> is used).</p> <p><b>Parameters:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Wall stratigraphy;</li> <li>• Surface properties;</li> <li>• Slope of the element;</li> <li>• Total area of internal surface of the upper zone.</li> </ul>	<p><b>Output:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Power bus to zone 1;</li> <li>• Temperature of the surface facing the upper zone;</li> <li>• Power bus to the lower zone;</li> <li>• Temperature of the surface facing the lower zone 2.</li> </ul>
 <p>Diagram of the <b>Ceiling_Rad_1_Rad_2</b> block. It shows a vertical list of inputs on the left and corresponding output labels on the right. The inputs are: Tzone 1, Qsg 1, Tzone 2, Qsg 2, Qrad_1, Qint_rad_1, Qrad_2, and Qint_rad_2. The output labels are: QT_L1, Ts_up, QT_L2, and Ts_down.</p>	<p><b>Input:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperature zone bus of upper zone;</li> <li>• Solar gains from the upper zone;</li> <li>• Temperature zone bus of lower zone;</li> <li>• Solar gains from the lower zone;</li> <li>• Radiative heat flux involving the ceiling internal surface, facing zone 1;</li> <li>• Radiative component of internal gains of zone 1;</li> <li>• Radiative heat flux involving the ceiling internal surface, facing zone 2;</li> <li>• Radiative component of internal gains of zone 2.</li> </ul>
<p><b>Description:</b> this block is used for modelling a ceiling that divides two thermal zone, both described by the <i>radiative model</i>.</p> <p><b>Parameters:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Wall stratigraphy;</li> <li>• Surface properties;</li> <li>• Slope of the element;</li> <li>• Total area of internal surface of both the zone.</li> </ul>	<p><b>Output:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Power bus to zone 1;</li> <li>• Temperature of the surface facing the upper zone (1);</li> <li>• Power bus to the lower zone (2);</li> <li>• Temperature of the surface facing the lower zone 2.</li> </ul>

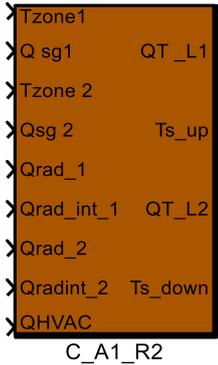
**Tabella B-4. Elenco dei blocchi che compongono il blockset degli elementi di involucro attivi.**

 <p style="text-align: center;">Act No Elements</p>	<p><b>Input:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperature zone bus;</li> <li>• Weather Data bus;</li> <li>• Solar radiation bus, accounting the incident radiation on external surface;</li> <li>• Internal Solar gains;</li> <li>• Radiative heat flux involving the internal surface of the element;</li> <li>• Radiative component of internal gains;</li> <li>• Power released by the fluid flowing across the element.</li> </ul>
<p><b>Description:</b> this block is used for the simulation of an external active wall. An additional node is added to the 3R4C network for accounting the active layer.</p> <p><b>Parameters:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Wall stratigraphy and position of the active layer;</li> <li>• Surface properties (area, solar absorbance and infrared emissivity of each side of the wall).</li> <li>• Total area of internal surface of the zone.</li> </ul>	<p><b>Output:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Superficial temperature bus;</li> <li>• Power bus of the building element.</li> </ul>
 <p style="text-align: center;">Roof_Active</p>	<p><b>Input:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperature zone bus;</li> <li>• Weather Data bus;</li> <li>• Solar radiation bus, accounting the incident radiation on external surface;</li> <li>• Internal Solar gains;</li> <li>• Radiative heat flux involving the internal surface of the element;</li> <li>• Radiative component of internal gains;</li> <li>• Power released by the fluid flowing across the element.</li> </ul>
<p><b>Description:</b> this block is used for the modelling of an active roof or non-vertical external massive elements. An additional node is added for the modelling of the active layer.</p> <p><b>Parameters:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Wall stratigraphy and position of the active layer;</li> <li>• Surface properties;</li> <li>• Slope of the element;</li> <li>• Total area of internal surface of the zone.</li> </ul>	<p><b>Output:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Superficial temperature bus;</li> <li>• Power bus of the building element.</li> </ul>

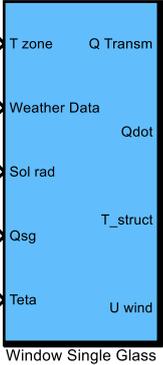
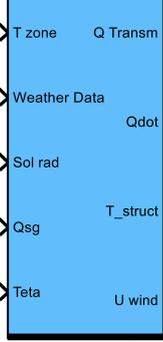
	<p><b>Input:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperature zone bus;</li> <li>• Internal Solar gains;</li> <li>• Weather Data bus;</li> <li>• Radiative heat flux involving the internal surface of the element;</li> <li>• Radiative component of internal gains;</li> <li>• Power released by the fluid flowing across the element.</li> </ul>
<p><b>Description:</b> this block is used for the modelling of an active slab-on-grade floor. An additional node is added for the modelling of the active layer.</p> <p><b>Parameters:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Floor stratigraphy and position of the active layer;</li> <li>• Ground data (EN 13370);</li> <li>• Additional floor data (EN 13370);</li> <li>• Surface properties;</li> <li>• Total area of internal surface of the zone.</li> </ul>	<p><b>Output:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Superficial temperature bus;</li> <li>• Power bus of the building element.</li> </ul>
	<p><b>Input:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperature zone bus of zone 1;</li> <li>• Solar gains from zone 1;</li> <li>• Temperature zone bus of zone 2;</li> <li>• Solar gains from zone 2.</li> <li>• Radiative heat flux involving the internal wall surface (to zone 2);</li> <li>• Radiative component of internal gains of zone 2.</li> <li>• Power released by the fluid flowing across the element.</li> </ul>
<p><b>Description:</b> this block is used for the modelling of an active internal wall dividing a zone (1) in which the <i>simple model</i> is adopted to a zone (2) described by the <i>radiative model</i>.</p> <p><b>Parameters:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Wall stratigraphy and position of the active layer;</li> <li>• Surface properties (area, solar absorbance and infrared emissivity of each side of the wall).</li> <li>• Total area of internal surface of the zone 2.</li> </ul>	<p><b>Output:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Power bus to zone 1;</li> <li>• Temperature of the surface facing zone 1;</li> <li>• Power bus to zone 2;</li> <li>• Temperature of the surface facing zone 2.</li> </ul>

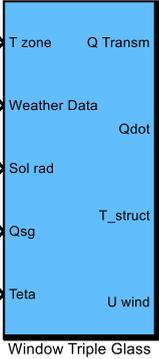
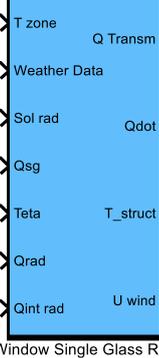
	<p><b>Input:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperature zone bus of zone 1;</li> <li>• Solar gains from zone 1;</li> <li>• Temperature zone bus of zone 2;</li> <li>• Solar gains from zone 2.</li> <li>• Radiative heat flux involving the internal wall surface (to zone 1);</li> <li>• Radiative heat flux involving the internal wall surface (to zone 2);</li> <li>• Radiative component of internal gains of zone 1;</li> <li>• Radiative component of internal gains of zone 2.</li> <li>• Power released by the fluid flowing across the element.</li> </ul>
<p><b>Description:</b> this block is used for the modelling of an active internal wall dividing a two thermal zones in which the <i>radiative model</i> is adopted.</p> <p><b>Parameters:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Wall stratigraphy and position of the active layer;</li> <li>• Surface properties (area, solar absorbance and infrared emissivity of each side of the wall).</li> <li>• Total area of internal surface of both the zones.</li> </ul>	<p><b>Output:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Power bus to zone 1;</li> <li>• Temperature of the surface facing zone 1;</li> <li>• Power bus to zone 2;</li> <li>• Temperature of the surface facing zone 2.</li> </ul>
	<p><b>Input:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperature zone bus of upper zone;</li> <li>• Solar gains from the upper zone;</li> <li>• Temperature zone bus of lower zone;</li> <li>• Solar gains from the lower zone;</li> <li>• Radiative heat flux involving the ceiling internal surface, facing zone 2;</li> <li>• Radiative component of internal gains of zone 2;</li> <li>• Power released by the fluid flowing across the element.</li> </ul>
<p><b>Description:</b> this block is used for the simulation of an active ceiling dividing the upper zone (1) described by the <i>simple model</i> to the lower zone (2) in which the <i>radiative model</i> is adopted. Thus, the active surface is facing the upper zone (radiant ceiling).</p> <p><b>Parameters:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Wall stratigraphy and active layer position;</li> <li>• Surface properties;</li> <li>• Total area of internal surface of the lower zone.</li> </ul>	<p><b>Output:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Power bus to zone 1;</li> <li>• Temperature of the surface facing the upper zone;</li> <li>• Power bus to the lower zone;</li> <li>• Temperature of the surface facing the lower zone 2.</li> </ul>

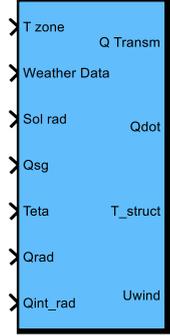
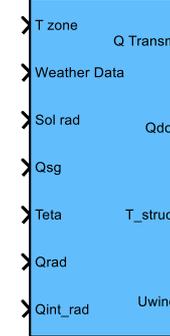
 <p style="text-align: center;">C_A1_S2</p>	<p><b>Input:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperature zone bus of upper zone;</li> <li>• Solar gains from the upper zone;</li> <li>• Temperature zone bus of lower zone;</li> <li>• Solar gains from the lower zone;</li> <li>• Radiative heat flux involving the ceiling internal surface, facing zone 1;</li> <li>• Radiative component of internal gains of zone 1;</li> <li>• Power released by the fluid flowing across the element.</li> </ul>
<p><b>Description:</b> this block is used for the simulation of an active ceiling dividing the upper zone (1) described by the <i>radiative model</i> to the lower zone (2) in which the <i>simple model</i> is adopted. Thus, the active surface is facing the upper zone (radiant floor).</p> <p><b>Parameters:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Wall stratigraphy and position of the active layer;</li> <li>• Surface properties;</li> <li>• Slope of the element;</li> <li>• Total area of internal surface of the upper zone.</li> </ul>	<p><b>Output:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Power bus to zone 1;</li> <li>• Temperature of the surface facing the upper zone;</li> <li>• Power bus to the lower zone;</li> <li>• Temperature of the surface facing the lower zone 2.</li> </ul>
 <p style="text-align: center;">C_R1_A2</p>	<p><b>Input:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperature zone bus of upper zone;</li> <li>• Solar gains from the upper zone;</li> <li>• Temperature zone bus of lower zone;</li> <li>• Solar gains from the lower zone;</li> <li>• Radiative heat flux involving the ceiling internal surface, facing zone 1;</li> <li>• Radiative component of internal gains of zone 1;</li> <li>• Radiative heat flux involving the ceiling internal surface, facing zone 2;</li> <li>• Radiative component of internal gains of zone 2;</li> <li>• Power released by the fluid flowing across the element.</li> </ul>
<p><b>Description:</b> this block is used for the simulation of an active ceiling dividing the two thermal zone described by the <i>radiative model</i>. The active surface is facing the lower zone (radiant ceiling).</p> <p><b>Parameters:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Wall stratigraphy and active layer position;</li> <li>• Surface properties;</li> <li>• Slope of the element;</li> <li>• Total area of internal surface of both the zones.</li> </ul>	<p><b>Output:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Power bus to zone 1;</li> <li>• Temperature of the surface facing the upper zone;</li> <li>• Power bus to the lower zone;</li> <li>• Temperature of the surface facing the lower zone 2.</li> </ul>

	<p><b>Input:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperature zone bus of upper zone;</li> <li>• Solar gains from the upper zone;</li> <li>• Temperature zone bus of lower zone;</li> <li>• Solar gains from the lower zone;</li> <li>• Radiative heat flux involving the ceiling internal surface, facing zone 1;</li> <li>• Radiative component of internal gains of zone 1;</li> <li>• Radiative heat flux involving the ceiling internal surface, facing zone 2;</li> <li>• Radiative component of internal gains of zone 2;</li> <li>• Power released by the fluid flowing across the element.</li> </ul> <p><b>Output:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Power bus to zone 1;</li> <li>• Temperature of the surface facing the upper zone;</li> <li>• Power bus to the lower zone;</li> <li>• Temperature of the surface facing the lower zone 2.</li> </ul>
<p><b>Description:</b> this block is used for the simulation of an active ceiling dividing the two thermal zone described by the <i>radiative model</i>. The active surface is facing the upper zone (radiant floor).</p> <p><b>Parameters:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Wall stratigraphy and active layer position;</li> <li>• Surface properties;</li> <li>• Slope of the element;</li> <li>• Total area of internal surface of both the zones.</li> </ul>	

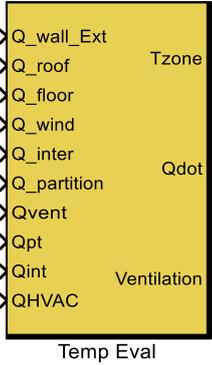
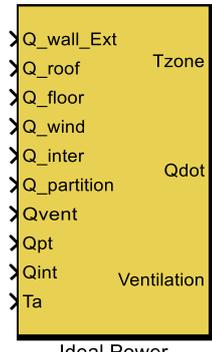
**Tabella B-5. Lista delle component del blockset per la modellazione degli elementi trasparenti dell'involucro edilizio.**

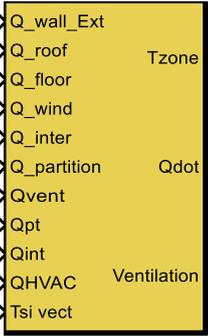
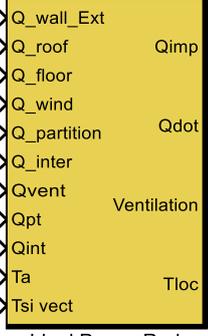
 <p style="text-align: center;">Window Single Glass</p>	<p><b>Input:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperature zone bus;</li> <li>• Weather Data bus;</li> <li>• Solar radiation bus accounting the incident solar radiation on external surface of the window;</li> <li>• Internal solar gain;</li> <li>• Angle of incidence of beam solar radiation.</li> </ul>
<p><b>Description:</b> this block is used for simulating the dynamic behaviour of a single glass window, if the two-star model is adopted for the thermal balance of the zone</p> <p><b>Parameters:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Window area;</li> <li>• Frame properties (frame factor, emissivity...)</li> <li>• Glass optical properties;</li> <li>• Shading devices properties;</li> <li>• Shutter properties</li> </ul>	<p><b>Output:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Direct and diffuse solar radiation transmitted by the window;</li> <li>• Power bus of the building element;</li> <li>• Superficial temperature bus;</li> <li>• Thermal transmittance of the window.</li> </ul>
 <p style="text-align: center;">Window Double Glass</p>	<p><b>Input:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperature zone bus;</li> <li>• Weather Data bus;</li> <li>• Solar radiation bus accounting the incident solar radiation on external surface of the window;</li> <li>• Internal solar gain;</li> <li>• Angle of incidence of beam solar radiation</li> </ul>
<p><b>Description:</b> this block is used for simulating the dynamic behaviour of a double glass window, if the two-star model is adopted for the thermal balance of the zone</p> <p><b>Parameters:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Window area;</li> <li>• Frame properties (frame factor, emissivity...)</li> <li>• Glass optical properties;</li> <li>• Gas gap properties;</li> <li>• Shading devices properties;</li> <li>• Shutter properties.</li> </ul>	<p><b>Output:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Direct and diffuse solar radiation transmitted by the window;</li> <li>• Power bus of the building element;</li> <li>• Superficial temperature bus;</li> <li>• Thermal transmittance of the window.</li> </ul>

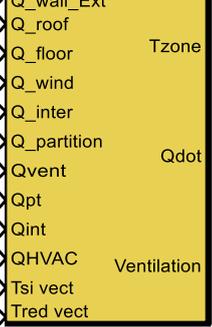
 <p style="text-align: center;">Window Triple Glass</p>	<p><b>Input:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperature zone bus;</li> <li>• Weather Data bus;</li> <li>• Solar radiation bus accounting the incident solar radiation on external surface of the window;</li> <li>• Internal solar gain;</li> <li>• Angle of incidence of beam solar radiation.</li> </ul>
<p><b>Description:</b> this block is used for simulating the dynamic behaviour of a triple glass window, if the two-star model is adopted for the thermal balance of the zone.</p> <p><b>Parameters:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Window area;</li> <li>• Frame properties (frame factor, emissivity...)</li> <li>• Glass optical properties;</li> <li>• Gas gap properties;</li> <li>• Shading devices properties;</li> <li>• Shutter properties.</li> </ul>	<p><b>Output:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Direct and diffuse solar radiation transmitted by the window;</li> <li>• Power bus of the building element;</li> <li>• Superficial temperature bus of the element;</li> <li>• Thermal transmittance of the window.</li> </ul>
 <p style="text-align: center;">Window Single Glass Rad</p>	<p><b>Input:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperature zone bus;</li> <li>• Weather Data bus;</li> <li>• Solar radiation bus accounting the incident solar radiation on external surface of the window;</li> <li>• Internal solar gain;</li> <li>• Angle of incidence of beam solar radiation.</li> <li>• Radiative heat transfer of the internal surface of the window with the surroundings;</li> <li>• Window fraction of the radiative component of the internal heat gains.</li> </ul>
<p><b>Description:</b> this block is used for simulating the dynamic behaviour of a single glass window, if the detailed radiative model is adopted for the thermal balance of the zone.</p> <p><b>Parameters</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Window area;</li> <li>• Frame properties (frame factor, emissivity...)</li> <li>• Glass optical properties;</li> <li>• Shading devices properties;</li> <li>• Shutter properties.</li> </ul>	<p><b>Output:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Direct and diffuse solar radiation transmitted by the window;</li> <li>• Power bus of the building element;</li> <li>• Superficial temperature bus;</li> <li>• Thermal transmittance of the window.</li> </ul>

 <p style="text-align: center;">Window Double Glass Rad</p>	<p><b>Input:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperature zone bus;</li> <li>• Weather Data bus;</li> <li>• Solar radiation bus accounting the incident solar radiation on external surface of the window;</li> <li>• Internal solar gain;</li> <li>• Angle of incidence of beam solar radiation.</li> <li>• Radiative heat transfer of the internal surface of the window with the surroundings;</li> <li>• Window fraction of the radiative component of the internal heat gains.</li> </ul>
<p><b>Description:</b> this block is used for simulating the dynamic behaviour of a double glass window, if the detailed radiative model is adopted for the thermal balance of the zone.</p> <p><b>Parameters:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Window area;</li> <li>• Frame properties;</li> <li>• Glass optical properties;</li> <li>• Gas gap properties;</li> <li>• Shading devices properties;</li> <li>• Shutter properties.</li> </ul>	<p><b>Output:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Direct and diffuse solar radiation transmitted by the window;</li> <li>• Power bus of the building element;</li> <li>• Superficial temperature bus;</li> <li>• Thermal transmittance of the window.</li> </ul>
 <p style="text-align: center;">Window Triple Glass Rad</p>	<p><b>Input:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperature zone bus;</li> <li>• Weather Data bus;</li> <li>• Solar radiation bus accounting the incident solar radiation on external surface of the window;</li> <li>• Internal solar gain;</li> <li>• Angle of incidence of beam solar radiation.</li> <li>• Radiative heat transfer of the internal surface of the window with the surroundings;</li> <li>• Window fraction of the radiative component of the internal heat gains.</li> </ul>
<p><b>Description:</b> this block is used for simulating the dynamic behaviour of a triple glass window, if the detailed radiative model is adopted for the thermal balance of the zone.</p> <p><b>Parameters:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Window area;</li> <li>• Frame properties;</li> <li>• Glass optical properties;</li> <li>• Gas gap properties;</li> <li>• Shading devices properties;</li> <li>• Shutter properties.</li> </ul>	<p><b>Output:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Direct and diffuse solar radiation transmitted by the window;</li> <li>• Power bus of the building element;</li> <li>• Superficial temperature bus;</li> <li>• Thermal transmittance of the window.</li> </ul>

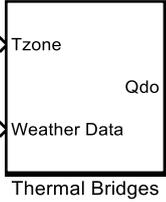
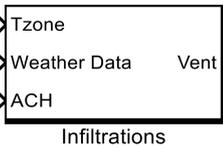
**Tabella B-6. Elenco delle component del blockset per la risoluzione del bilancio termico di una zona termica dell'edificio.**

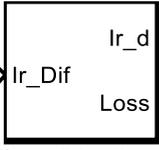
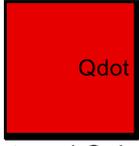
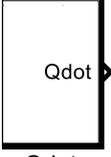
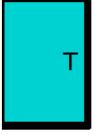
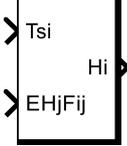
	<p><b>Input:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Total power bus related to external walls;</li> <li>• Total power bus related to zone roofs;</li> <li>• Power bus related to floor;</li> <li>• Total power bus related to zone windows;</li> <li>• Total power bus related to zone intersections (ceilings and internal walls);</li> <li>• Total power bus related to zone partitions;</li> <li>• Ventilation bus;</li> <li>• Thermal bridges power bus;</li> <li>• Power bus related to internal gains;</li> <li>• Power bus related to HVAC emitters.</li> </ul>
<p><b>Description:</b> this block is used for the evaluation of the air and mean radiant temperature of the thermal zone, according to the two-star network of the <i>simple model</i>. As input, it requires the power buses of all the elements composing the thermal zone.</p> <p><b>Parameters:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Initial air temperature;</li> <li>• Net volume of the zone.</li> </ul>	<p><b>Output:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperature zone bus;</li> <li>• Total power bus of the zone;</li> <li>• Total ventilation bus of the zone.</li> </ul>
	<p><b>Input:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Total power bus related to external walls;</li> <li>• Total power bus related to zone roofs;</li> <li>• Power bus related to floor;</li> <li>• Total power bus related to zone windows;</li> <li>• Total power bus related to zone intersections (ceilings and internal walls);</li> <li>• Total power bus related to zone partitions;</li> <li>• Ventilation bus;</li> <li>• Thermal bridges power bus;</li> <li>• Power bus related to internal gains;</li> <li>• Air set-point temperature.</li> </ul>
<p><b>Description:</b> this block is used for the evaluation of the ideal convective power required by the thermal zone for maintaining the air temperature equal to set point value. The evaluation of the convective power is achieved adopting the two-star network of the <i>simple model</i>.</p> <p><b>Parameters:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Initial air and mean radiative temperature;</li> <li>• Net volume of the zone.</li> </ul>	<p><b>Output:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperature zone bus;</li> <li>• Total power bus of the zone;</li> <li>• Total ventilation bus of the zone.</li> </ul>

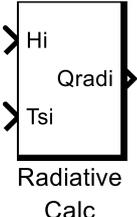
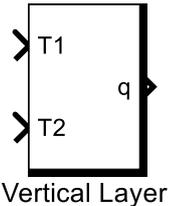
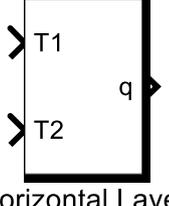
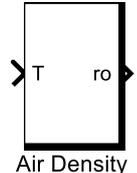
 <p style="text-align: center;">Temp Eval Rad</p>	<p><b>Input:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Total power bus related to external walls;</li> <li>• Total power bus related to zone roofs;</li> <li>• Power bus related to floor;</li> <li>• Total power bus related to zone windows;</li> <li>• Total power bus related to zone intersections (ceilings and internal walls);</li> <li>• Total power bus related to zone partitions;</li> <li>• Ventilation bus;</li> <li>• Thermal bridges power bus;</li> <li>• Power bus related to internal gains;</li> <li>• Power bus related to HVAC emitters;</li> <li>• Vector composed by the internal surface temperature of the elements.</li> </ul> <p><b>Output:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperature zone bus;</li> <li>• Total power bus of the zone;</li> <li>• Total ventilation bus of the zone.</li> </ul>
<p><b>Description:</b> this block is used for the evaluation of the air and mean radiant temperature of the thermal zone, according to the <i>radiative model</i>. The mean air temperature is evaluated from internal surface temperature of the envelope elements collected in the <i>Tsi vect</i>. These temperatures have to be listed in the same order used in the geometrical description of the thermal zone.</p> <p><b>Parameters:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Initial air and radiative temperature;</li> <li>• Net volume of the zone;</li> <li>• View factor (between internal surface and temperature sensor) matrix.</li> </ul>	 <p style="text-align: center;">Ideal Power Rad</p> <p><b>Input:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Total power bus related to external walls;</li> <li>• Total power bus related to zone roofs;</li> <li>• Power bus related to floor;</li> <li>• Total power bus related to zone windows;</li> <li>• Total power bus related to zone intersections (ceilings and internal walls);</li> <li>• Total power bus related to zone partitions;</li> <li>• Ventilation bus;</li> <li>• Thermal bridges power bus;</li> <li>• Power bus related to internal gains;</li> <li>• Air temperature set-point;</li> <li>• Vector composed by the internal surface temperature of the elements.</li> </ul> <p><b>Output:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperature zone bus;</li> <li>• Total power bus of the zone;</li> <li>• Total ventilation bus of the zone.</li> </ul>
<p><b>Description:</b> this block is used for the evaluation of the ideal convective power required by the thermal zone for maintaining the air temperature equal to set point value. Convective power is estimated by adopting the simple model, whilst mean radiative temperature is calculated using the <i>radiative model</i>.</p> <p><b>Parameters:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Initial mean radiative temperature;</li> <li>• Net volume of the zone;</li> <li>• View factor (between internal surface and temperature sensor) matrix.</li> </ul>	

 <p>BTB convective model</p>	<p><b>Input:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Total power bus related to external walls;</li> <li>• Total power bus related to zone roofs;</li> <li>• Power bus related to floor;</li> <li>• Total power bus related to zone windows;</li> <li>• Total power bus related to zone intersections (ceilings and internal walls);</li> <li>• Total power bus related to zone partitions;</li> <li>• Ventilation bus;</li> <li>• Thermal bridges power bus;</li> <li>• Power bus related to internal gains;</li> <li>• Power bus related to HVAC emitters;</li> <li>• Vector composed by the reduced air temperature of thermal zone cells.</li> </ul> <p><b>Output:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperature zone bus;</li> <li>• Total power bus of the zone;</li> <li>• Total ventilation bus of the zone.</li> </ul>
<p><b>Description:</b> in this block the thermal balance of the zone is solved according to the <i>convective model</i>. The mean indoor air temperature is evaluated by the reduced temperature of each air cell in which the zone is split. The mean radiant temperature is estimated by the one-star network.</p> <p><b>Parameters:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Initial mean radiative temperature;</li> <li>• Net volume of the zone.</li> </ul>	<p><b>Input:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Total power bus related to external walls;</li> <li>• Total power bus related to zone roofs;</li> <li>• Power bus related to floor;</li> <li>• Total power bus related to zone windows;</li> <li>• Total power bus related to zone intersections (ceilings and internal walls);</li> <li>• Total power bus related to zone partitions;</li> <li>• Ventilation bus;</li> <li>• Thermal bridges power bus;</li> <li>• Power bus related to internal gains;</li> <li>• Power bus related to HVAC emitters;</li> <li>• Vector composed by the internal surface temperature of the elements;</li> <li>• Vector composed by the reduced air temperature of thermal zone cells.</li> </ul> <p><b>Output:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperature zone bus;</li> <li>• Total power bus of the zone;</li> <li>• Total ventilation bus of the zone.</li> </ul>
 <p>BTB fully detailed</p>	<p><b>Description:</b> in this block the thermal balance of the zone is solved according to the <i>fully detailed model</i>. Convective and radiative models are coupled, therefore mean indoor air temperature is evaluated by the reduced temperature of each air cell in which the zone is split; whilst the mean radiant temperature is estimated by the internal surface temperature of the envelope elements, by knowing the view factor among temperature sensor and envelope elements.</p> <p><b>Parameters:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Initial mean radiative temperature;</li> <li>• Net volume of the zone;</li> <li>• View factor (between internal surface and temperature sensor) matrix.</li> </ul>

**Tabella B-7. Blocchi aggiuntivi utilizzati per la descrizione di una zona termica.**

	<p><b>Input:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperature zone bus;</li> <li>• Weather data bus.</li> </ul> <p><b>Output:</b> Power bus.</p>
<p><b>Description:</b> this block is used for the evaluation of the heat transfer across the thermal bridges. A simplified model is adopted, consisting in the evaluation of the total heat losses coefficient; heat losses are equally split in convective and radiative thermal loads.</p>	<p><b>Parameters:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Total heat losses coefficient;</li> <li>• Total thermal bridge length;</li> <li>• Mean thermal capacity of walls in the zone.</li> </ul>
	<p><b>Input:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperature zone bus;</li> <li>• Weather data bus;</li> <li>• Air change rate.</li> </ul> <p><b>Output:</b> Ventilation bus.</p>
<p><b>Description:</b> this block is used for the evaluation of thermal loads due to air infiltrations.</p>	<p><b>Parameters:</b> Net volume of the thermal zone.</p>
	<p><b>Input:</b> Solar radiation bus composed by the transmitted incident solar radiation.</p> <p><b>Output:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Beam solar gain for each envelope element of the thermal zone;</li> <li>• Sum of diffuse solar radiation transmitted by the window and of the reflected fraction of the transmitted beam solar radiation not absorbed by the envelope element.</li> </ul>
<p><b>Description:</b> <i>Direct Distribution</i> block (see 2.7.2), this block is used for the calculation of distribution, among the internal surface of the envelope elements composing the thermal zone in which the specific window linked to this block is inserted, of the beam component of the incident solar radiation transmitted by the window.</p>	<p><b>Parameters:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Name of the thermal zone in which the window is inserted;</li> <li>• Row index of the geometry matrix defining the position of the window in the thermal zone.</li> </ul>

 <p style="text-align: center;">Diffuse Distribution</p> <p><b>Description:</b> <i>Diffuse Distribution</i> block (see 2.7.2), this block is used for the calculation of the diffuse component of the solar gain due to the solar radiation transmitted by the window.</p>	<p><b>Input:</b> Sum of diffuse solar radiation transmitted by the window and of the reflected fraction of the transmitted</p> <p><b>Output:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Diffuse solar gain for each envelope element of the thermal zone in which the window is inserted;</li> <li>• Solar radiation transmitted back to the external environment.</li> </ul> <p><b>Parameters:</b> Name of the thermal zone in which the window is inserted.</p>
 <p style="text-align: center;">Internal Gains</p> <p><b>Description:</b> this block is used for the definition of the internal gain profile for a specific thermal zone.</p>	<p><b>Input:</b> None</p> <p><b>Output:</b> Power bus.</p> <p><b>Parameters:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Convective internal gain schedule for weekdays;</li> <li>• Radiative internal gain schedule for weekdays;</li> <li>• Convective internal gain schedule for weekend;</li> <li>• Radiative internal gain schedule for weekend.</li> </ul>
 <p style="text-align: center;">Constant Power bus</p> <p><b>Description:</b> this block is used for defining a constant power bus.</p>	<p><b>Input:</b> None</p> <p><b>Output:</b> Power bus.</p> <p><b>Parameters:</b> Signals of the Power bus.</p>
 <p style="text-align: center;">Constant T</p> <p><b>Description:</b> this block is used for the definition of a constant air temperature bus.</p>	<p><b>Input:</b> None.</p> <p><b>Output:</b> Temperature zone bus.</p> <p><b>Parameters:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Air temperature;</li> <li>• Mean radiant temperature.</li> </ul>
 <p style="text-align: center;">Radiosity Calc</p>	<p><b>Input:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperature of the surface;</li> <li>• Incident infrared radiation.</li> </ul> <p><b>Output:</b> Radiosity of the surface.</p>
<p><b>Description:</b> <i>Radiosity Calculation</i> block, used for the calculation of the radiosity of a surface.</p>	<p><b>Parameters:</b> Infrared emissivity of the surface.</p>

	<p><b>Input:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Radiosity of the surface;</li> <li>• Temperature of the surface.</li> </ul> <p><b>Output:</b> Net radiative heat flux of the surface.</p>
<p><b>Description:</b> <i>Radiative calculation</i> block, used for the evaluation of the net radiative heat flux of a surface.</p>	<p><b>Parameters:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Infrared emissivity of the surface;</li> <li>• Area of the surface.</li> </ul>
	<p><b>Input:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperature of the air cell 1;</li> <li>• Temperature of the air cell 2.</li> </ul> <p><b>Output:</b> Heat flux across the layer.</p>
<p><b>Description:</b> this block is used for the evaluation of the heat transfer due to the mass transfer across a vertical layer, that separates two adjacent air cells, according to the <i>convective model</i>.</p>	<p><b>Parameters:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Air pressure;</li> <li>• Layer length;</li> <li>• Layer height;</li> <li>• Discharge factor.</li> </ul>
	<p><b>Input:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperature of the upper air cell;</li> <li>• Temperature of the lower air cell.</li> </ul> <p><b>Output:</b> Heat flux across the layer.</p>
<p><b>Description:</b> this block is used for the evaluation of the heat transfer due to the mass transfer across a horizontal layer, that separates two adjacent air cells, according to the <i>convective model</i>. Label 1 refers to the upper air cell.</p>	<p><b>Parameters:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Air pressure;</li> <li>• Layer length;</li> <li>• Height of the upper cell;</li> <li>• Height of the lower cell;</li> <li>• Discharge factor.</li> </ul>
	<p><b>Input:</b> Air temperature of the cell.</p> <p><b>Output:</b> Air density.</p>
<p><b>Description:</b> this block is used for the evaluation of the air density, adopting the perfect gas law.</p>	<p><b>Parameters:</b> Pressure of the air cell.</p>

<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content;"> <p>             &gt; Tzone              &gt; HR            PMV              &gt; Vel              &gt; Clo            PPD              &gt; Met           </p> <p style="text-align: center;">Comfort</p> </div>	<p><b>Input:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperature zone bus;</li> <li>• Indoor humidity ratio;</li> <li>• Air velocity;</li> <li>• Clothing (clo);</li> <li>• Metabolic rate (met).</li> </ul> <p><b>Output:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Predicted Mean Vote (PMV);</li> <li>• Percentage of Person Dissatisfied (PPD).</li> </ul> <p><b>Parameters:</b> None</p>
<p><b>Description:</b> this block is used for the evaluation of the comfort indexes PMV and PPD evaluated according to EN 7730.</p>	

## 9 Appendice C: Curriculum scientifico del gruppo di lavoro

### Gian Luca Morini:

Professore Ordinario di Energetica degli Edifici e Termotecnica ING-IND/10 (Fisica Tecnica Industriale) presso l'Università di Bologna dal 2012. Dal 2002 al 2012 è stato Professore Associato presso la stessa Università. È stato segretario della sezione Emilia-Romagna dell'Associazione Termotecnica Italiana (ATI) dal 2005 al 2017. È membro dell'UIT (Unione Italiana Termofluidodinamica) e dell'AICARR (Associazione Italiana Condizionamento dell'Aria, Riscaldamento e Refrigerazione). Dal 2006 è il rappresentante italiano del Consiglio EUROTHERM. Dal 2008 è membro del Consiglio Scientifico di SHF (Société Hydrotechnique de France). Dal 2008 è membro del Consiglio Scientifico dell'ICHMT (International Center of Heat and Mass Transfer). Dal 2009 è membro dell'Assemblea della World Conference (AWC) on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics, and Thermodynamics. Ha operato quale ricercatore nell'ambito di numerosi contratti e convenzioni di ricerca con Enti Pubblici e Privati e nell'ambito di progetti di ricerca nazionali (PRIN) del Ministero dell'Università e della Ricerca Scientifica in qualità di Responsabile scientifico di Unità e nell'ambito di progetti Europei in qualità di responsabile scientifico (Progetto GASMEMS (2008-2012), Marie Curie Actions, 7 Programma Quadro e MIGRATE (2015-2019) Marie Curie Actions, H2020), Progetto Hybrid BioVGE H2020 (2019-2022). È autore di più di 200 pubblicazioni scientifiche sui temi dell'energetica e dei sistemi a pompa di calore.

### Claudia Naldi:

Ricercatrice RTD-A presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Bologna dal 2020 e precedentemente Assegnista di Ricerca presso il medesimo Dipartimento. Ha ricevuto il Dottorato di Ricerca dall'Università di Bologna per la tesi dal titolo: "Development and applications of simulation codes for air-to-water and ground-coupled heat pump systems". Svolge attività di ricerca nell'ambito delle pompe di calore accoppiate al terreno e ad aria, per riscaldamento invernale, raffrescamento estivo e produzione di acqua calda sanitaria per edifici ed è autrice di una ventina di pubblicazioni scientifiche sul tema. In particolare, si occupa dello sviluppo di codici di simulazione dinamica per impianti a pompa di calore aria-acqua e accoppiata al terreno ai fini di ottimizzarne le prestazioni stagionali e della simulazione numerica agli elementi finiti di pompe di calore accoppiate al terreno a sonde verticali per lo sviluppo di nuove *g-functions*. Si occupa inoltre della caratterizzazione numerica e sperimentale di materiali a cambiamento di fase. È membro dell'AICARR (Associazione Italiana Condizionamento dell'Aria, Riscaldamento e Refrigerazione). Ha partecipato ad alcuni progetti di ricerca nazionali ed europei su temi relativi alle pompe di calore e al retrofit energetico degli edifici.

### Paolo Valdiserri:

Ricercatore Universitario di Fisica Tecnica Industriale (ING-IND/10) presso l'Università di Bologna. È membro della sezione Emilia-Romagna dell'Associazione Termotecnica Italiana (ATI). È membro dell'UIT (Unione Italiana Termofluidodinamica) e dell'AICARR (Associazione Italiana Condizionamento dell'Aria, Riscaldamento e Refrigerazione). Ha operato quale ricercatore nell'ambito di numerosi contratti e convenzioni di ricerca con Enti Pubblici e Privati e nell'ambito di progetti di ricerca nazionali (PRIN) del Ministero dell'Università e della Ricerca Scientifica in qualità di membro del gruppo di ricerca. L'attività principale di ricerca esamina i fenomeni di scambio termico sia in regime stazionario che dinamico in apparati di uso comune nelle applicazioni industriali e civili. Diversi studi si inseriscono all'interno delle problematiche descritte nelle direttive europee e decreti italiani che vanno sotto il nome dell'efficienza energetica negli edifici.

### Cesare Biserni:

Professore Associato di Fisica Tecnica Ambientale (ING-IND/11) presso l'Università di Bologna. È membro della sezione Emilia-Romagna dell'Associazione Termotecnica Italiana (ATI). È membro dell'UIT (Unione Italiana Termofluidodinamica). Ha operato quale ricercatore nell'ambito di numerosi contratti e convenzioni di ricerca con Enti Pubblici e Privati e nell'ambito di progetti di ricerca nazionali (PRIN) del

Ministero dell'Università e della Ricerca Scientifica e in Progetti Europei H2020 in qualità di membro del gruppo di ricerca. L'attività principale di ricerca esamina i fenomeni di scambio termico sia in regime stazionario che dinamico con tecniche numeriche basate sulla teoria costruttale. Esperto di Acustica edilizia. Ha ricevuto Premio UIT (Unione Italiana di Termofluidodinamica) per la migliore Tesi di Dottorato e nel 2012 il riconoscimento dell'ASME (American Society of Mechanical Engineering) come "Outstanding Reviewer 2012".